

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra energetiky

Výroba elektřiny z akumulovaného tepla v systému pro
akumulaci elektřiny

Production of Electricity from Accumulated Heat in
System for Electricity accumulation

Student: Martin Vařák

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Ladislav Vilimec

Ostrava 2017

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Martin Vařák**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2302T006 Energetické stroje a zařízení
Téma: **Výroba elektřiny z akumulovaného tepla v systému pro akumulaci elektřiny**
Production of Electricity from Accumulated Heat in System for Electricity Accumulation
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte rešerši na akumulaci elektřiny
2. Popište tepelné schéma akumulace elektřiny v tlakovém vzduchu
3. Stanovte tepelnou bilanci horkovodního akumulátoru
4. Stanovte elektrický výkon dosažený z horkovodního akumulátoru
5. Vypracujte tepelné schéma akumulace s horkovodním akumulátorem
6. Navrhněte horkovodní akumulátor

Seznam doporučené odborné literatury:

DLOUHÝ, T.: Výpočty kotlů a spalinových výměníků

MISÁREK, D.: Turbokompresory. Praha, SNTL 1963

ČSN EN 12952-53

VILIMEC, L.; JOSIEK, J.: Materiály a pevnostní dimenzování částí parních generátorů. Skripta VŠB TU Ostrava. ISBN 978-80-248-2512-0

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Ladislav Vilimec**

Datum zadání: 09.12.2016

Datum odevzdání: 15.05.2017



doc. Ing. Kamil Kolarčík, CSc.
vedoucí katedry

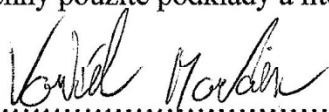


doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 15. 5. 2017




.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́домі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́домі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 15. 5. 2017



podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Bc. Martin Vařák

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Nový Svět 223,

739 23 Stará Ves nad Ondřejnicí

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

VAŘÁK, M. *Výroba elektřiny z akumulovaného tepla v systému pro akumulaci elektřiny: diplomová práce*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2017, 76 s. Vedoucí práce: Vilímeček, L.,

Tato diplomová práce je zaměřena na možnosti akumulace energie a její následné využití. Cílem práce je vypracování návrhu vysokotlakého horkovzdušného akumulátoru pro decentralizovaný akumulační zdroj. V teoretické části jsou rozebrány důvody akumulace energie včetně jejich jednotlivých technologií ve světě. Dále jsou přiblíženy hlavní parametry a především princip, na kterém akumulace pracují. Praktická část detailně objasňuje technologii Compressed Air Energy Storage (tedy akumulace energie v tlakovém vzduchu, dále jen CAES), na které pracuje základní část principu výroby elektřiny z akumulovaného tepla v systému pro akumulaci tepla. Dále jsou zde objasněny jednotlivé klíčové sekce, které přímo ovlivňují provoz technologie. Závěr práce je věnován návrhu zařízení pro určité hodnoty včetně následného porovnání možností.

ANNOTATION OF DIPLOMA THESIS

VAŘÁK, M. *Production of Electricity from Accumulated Heat in System for Electricity accumulation: Diploma thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Energy Engineering, 2015, 76 p. Thesis head: Vilimec, L.

This thesis is focused on the possibilities of energy accumulation and its subsequent use. The aim of the thesis is to design a high-pressure hot-air accumulator for a decentralized accumulator source. In the theoretical parts is discarded the reasons for the accumulation of energy, including their individual technologies of accumulation in the world. Furthermore, there is approximated the main parameters and especially the principle on which the accumulation works. The practical part is explained in detail by the technology Compressed Air Keeps Energy (the accumulation of energy in the compressed air, CAES), on which works the basic part of the principle of electricity generation from the accumulated heat in the heat storage system. In addition, there are clarified the individual key sections that directly affect the operation of the technology. The conclusion of the thesis is devoted to the design of devices for certain values, including the subsequent comparison of possibilities.

Obsah

1 Úvod	5
2 Rešerše na téma akumulace elektřiny	7
2.1 Historie a důvody akumulace energie	7
2.2 Centrální soustava	8
2.3 Rozložení výkyvů elektrizační soustavy – současná situace	9
2.4 Rozdělení akumulčních systémů	10
2.4.1 Mechanické akumulátory	11
2.4.2 Elektromagnetické akumulátory	16
2.4.3 Elektrochemické akumulátory	17
2.4.4 Chemické akumulátory	20
2.4.5 Tepelné akumulátory	21
2.5 Důležité ukazatele kvality akumulčních zařízení a jejich porovnání	21
3 Popis tepelného schéma akumulace elektřiny v tlakovém vzduchu	25
3.1 Rozdělení systému CAES dle základní technologie zapojení	25
3.2 Varianty akumulčních elektráren systému CAES dle využívaných technologií	30
3.3 Alternativa CAES pro decentralní energetické centrály s akumulací energie v tlakovém vzduchu (EC CAES)	31
3.3.1 Systém CAES s akumulací tepla akumulčního kompresoru	32
4 Tepelná bilance horkovodního akumulátoru	36
4.1 Zjednodušené schéma systému s horkovodním akumulátorem pro výpočet základních hodnot	36
4.2 Výpočty základních hodnot	37
4.3 Analýza vlivu změny parametrů horké vody v akumulátoru na průtoky v celém systému	40
4.4 Skutečné schéma systému s horkovodním akumulátorem	45
5 Elektrický výkon horkovodního akumulátoru	47
5.1 Výpočet elektrického výkonu generátoru	47
5.2 Analýza vlivu změny parametrů horké vody v akumulátoru na výrobu elektřiny	50
6 Tepelné schéma akumulace s horkovodním akumulátorem EC - CAES	52
6.1 Základní rozdělení schématu	52
6.2 Popis funkce celého zařízení	55
7 Návrh horkovodního akumulátoru	57

7.1 Výpočet hodnot stěn pláště	58
7.2 Výběr velikosti dna	60
7.3 Výpočet hodnot sestavené akumulční nádrže.....	63
7.4 Určení ceny akumulátoru	65
7.5 Analýza vlivu ceny podle velikosti průměru.....	67
8 Závěr.....	69
9 Seznam použité literatury	71
10 Seznam tabulek	73
11 Seznam obrázků	74
12 Seznam grafů.....	75
13 Přílohy	76

1 Úvod

V současné době je elektrická energie nepostradatelnou součástí lidského života. Se zvyšujícím se počtem obyvatel na Zemi a s rostoucím životním standardem roste i spotřeba elektrické energie. Zvyšující se produkce elektrické energie ve velké míře zatěžovala životní prostředí, což vedlo k počátkům využívání obnovitelných zdrojů pro výrobu elektrické energie. Jelikož jsou obnovitelné zdroje závislé na počasí, ať už se jedná o větrné, solární nebo jiné elektrárny, docházelo ke stále větším výkyvům v elektrické síti.

S růstem výkyvů v síti je spojeno větší zatížení velkých elektráren, které vzhledem k jejich omezené regulaci nejsou schopny rychle reagovat a pokrývat dané výkyvy, např. uhelná elektrárna najíždí na plný výkon 7 a více hodin a jaderná až několik týdnů. Pro pokrytí těchto výkyvů bylo nutné vymyslet jiný způsob, čímž bylo rozšíření a modernizace akumulačních prostředků. Akumulačních technologií je dnes celá řada. Každá z nich je vhodná pro konkrétní využití. Tato práce se bude podrobněji zabývat akumulací energie v systému CAES.

Cílem práce je zhodnocení výroby elektřiny z akumulovaného tepla v systému pro akumulaci elektřiny. Zhodnocení je provedeno na základě výpočtů tepelné bilance horkovodního akumulátoru. A následně jsou v závěru práce navrženy parametry horkovodního akumulátoru.

První část práce je zaměřena na stručné objasnění jednotlivých technologií a možností akumulačních zařízení, včetně jejich využití. V závěru kapitoly je provedeno porovnání technologií akumulace vzhledem ke vhodnosti použití a daným akumulačním parametrům.

Další část práce obsahuje tepelné schéma akumulace energie v tlakovém vzduchu. Je zde přiblížen chod decentrální kogenerační elektrárny využívající systém CAES. Tento systém pracuje s externím kompresorem, aby byl schopen nezávislé výroby elektrické energie a akumulace elektrické energie do stlačeného vzduchu. Navíc je pro zvýšení účinnosti použito mezistupňové chlazení kompresoru pro využití kompresního tepla.

Další část práce je zaměřena na výpočty tepelných bilancí horkovodního akumulátoru dle zadaných hodnot. Na základě těchto bilancí je stanoven elektrický výkon generátoru

dosažený z tepelné energie horkovodního akumulátoru. Tyto výpočty jsou prováděny pro 3 různé teploty v horkovodním akumulátoru, které jsou následně zhodnoceny. Dále bude vypracováno tepelné schéma akumulace s horkovodním akumulátorem včetně vlastního návrhu horkovodního akumulátoru.

Zadané parametry (po dobu vybíjení 1 hodiny):

Hodnoty ve vodní nádrži:

$$m_1 = 24\,983 \text{ kg}$$

$$p = 40 \text{ bar}$$

$$t = 240 \text{ °C}$$

$$x = 0$$

Hodnoty na vstupu do přehříváku

z horkovodní nádrže:

$$p = 40 \text{ bar}$$

$$t = 240 \text{ °C}$$

$$x = 0$$

Hodnoty vstupující do expandéru:

$$p = 40 \text{ bar}$$

$$t = 240 \text{ °C}$$

$$x = 0$$

Hodnota vody na výstupu

z přehříváku:

$$p = 39,99 \text{ bar (uvažujeme minimální ztráty tlaku)}$$

$$t = 168,8 \text{ °C}$$

$$x = 0$$

Hodnoty v expandéru:

$$p = 6 \text{ bar}$$

$$t = 158,83 \text{ °C}$$

Hodnota na vstupu do turbíny:

$$p = 5,99 \text{ bar (uvažujeme minimální ztráty tlaku)}$$

$$t = 210 \text{ °C}$$

$$x = 1$$

Hodnota vody na výstupu z expandéru:

$$p = 6 \text{ bar}$$

$$t = 158,8 \text{ °C}$$

$$x = 0$$

Hodnota na výstupu z turbíny:

$$p = 0,07 \text{ bar}$$

$$t = 39 \text{ °C}$$

$$x = 0,8944$$

Hodnota páry na výstupu z expandéru:

$$p = 6 \text{ bar}$$

$$t = 158,8 \text{ °C}$$

$$x = 1$$

Všechny hodnoty tlaku v této diplomové práci jsou zapisovány v absolutním tlaku.

2 Rešerše na téma akumulace elektřiny

Ke zpracování této kapitoly byly využity tyto zdroje [1, 4, 5, 9, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 21, 22]

Kapitola obsahuje historii akumulace energie, a zároveň zahrnuje její odůvodnění. Dále je zaměřena na stručný popis jednotlivých druhů akumulčních technologií.

2.1 Historie a důvody akumulace energie

Pojem akumulace neboli shromažďování a uchovávání energie není vůbec nový, naopak je znám již od dob, kdy hrnčíři započali své umění na hrnčířském kruhu. Hrnčíř nohou předal kruhu kinetickou energii, kterou dále využíval pro tvarování talířů či jiných výrobků. Tento vynález byl znám již několik tisíc let před naším letopočtem.

V případě akumulace energie se vždy jedná o přeměnu energie na formu, ve které ji dokážeme snadno a efektivně skladovat, ale především v případě nutnosti vrátit zpět na energii elektrickou, nebo jinou potřebnou formu energie. Zkráceně se jedná o uschování energie pro pozdější použití. K akumulaci je zapotřebí akumulátorů, kterých je mnoho druhů (viz níže).

Jednotlivé druhy akumulátorů se liší způsobem využití. Mezi ty nejvýznamnější kritéria, podle kterých určujeme pole působnosti, patří především oblast výkonů a kapacit. Mezi další kritéria patří např. účinnost, doba udržení energie, životnost, počet cyklů.

Nároky na akumulaci se časem mění. Před několika desítkami let byly kladeny nároky na uložení energie do přenosných akumulátorů, aby se stal člověk flexibilnějším a svobodnějším. Tato potřeba přetrvává i dnes, kdy se přenosné akumulátory stále více zdokonalují. S modernizací technologií a nárůstem poptávky po elektrické energii začalo narůstat kolísání přenosové sítě. Čímž vznikl nárok na vývoj velkých nepřenosiých akumulátorů poskytujících velký výkon i kapacitu pro vyrovnávání hodnot v elektrické síti. Dalším důvodem kolísání přenosové sítě je stále častější využívání obnovitelných zdrojů, které nedokážeme nijak regulovat, a jejich řízení je přenecháno hříčkám přírody.

Naše hlavní zdroje výroby elektřiny, kterými jsou tepelné a jaderné elektrárny, nejsou uzpůsobené promptně reagovat na stav sítě. V minulosti byl tento problém řešen převážně pomocí vodních elektráren. Jednalo se o řešení, které pokrývalo veškerou potřebu akumulace, ale se zvětšujícími se nároky na spotřebu elektrické energie se jedná pouze o částečné řešení. Proto je kladen velký důraz na vyvíjení nových technologií akumulace energie, které by pokryly současnou potřebu.

2.2 Centrální soustava

Rozšiřování naší elektrizační soustavy do větších celků započalo 11. října 1992, kdy spolu s Maďarskem, Polskem a Slovenskem vznikla síť CENTREL. Velkou částí tohoto projektu byla příprava na následné připojení do sítě UCPTE (Union for the coordination of production and transmission of electricity), neboli Sdružení pro koordinaci výroby a přenosu elektrické energie. Tato síť vznikla již roku 1951 a dodnes jsou její součástí téměř všechny státy západní Evropy. Patří do ní dokonce i Velká Británie, která je připojena výkonovými podmořskými kabely vedenými skrz kanál La Manche. Soustava CENTREL byla propojena se západoevropskou energetickou sítí 18. října 1995.

Zvětšování elektrizační soustavy dopomáhá k lepším možnostem pro vyrovnávání přebytků a nedostatků požadovaného výkonu. I z hlediska ekonomiky, vzhledem k možnosti prodeje přebytků okolním státům, je její využívání pro Českou republiku (dále jen ČR) výhodné avšak v případě, že bychom se dostali do situace, kdy bychom museli energii odkupovat, stalo by se to pro ČR méně ekonomicky výhodné.

Pokud máme přebytek elektrické energie, snažíme se jej dodávat do ostatních zemí. Cena prodeje takovéto přebytkové energie není příliš vysoká a prodává se přibližně za cenu levnější noční energie. V případě nedostatku energie potřebujeme část energie nakoupit od okolních zemí. Cena této energie je však výrazně vyšší než cena, za kterou prodáváme do zahraničí my. Situace přebytku a nedostatku energie je velmi kolísavá, a tak se může stát, že energii, kterou levně prodáme, můžeme eventuálně za chvíli draze nakoupit zpět. Část této situace můžeme připsat lepší ekonomice okolních států.

Dlouho probíranou možností je realizování projektu, který zahrnuje zvětšení elektroenergetické soustavy na velikost 120 poledníků. Tímto by se dala, díky posunu času, odchylka mezi výkyvy minimalizovat. Tato metoda není prozatím možná, kvůli nepříznivé politické situaci a rozdílné technické vybavenosti mezi západoevropskými a východoevropskými zeměmi. Dalším důvodem nemožnosti realizace projektu je drahá a ztrátová dálková doprava a značné riziko rozdílnosti cen mezi nakupovanou a prodávanou energií.

Možným řešením této situace je akumulace energie, která by řešila problém kde čerpat energii, pokud by chyběla, případně jak upotřebit přebytek energie. Pro správnou efektivitu elektráren a udržení elektrifikační soustavy ve správných hodnotách jsou zapotřebí akumulární místa, která by zajistila shromažďování elektřiny v řádech gigawattů.

2.3 Rozložení výkyvů elektrizační soustavy – současná situace

V současné době dochází ve střední Evropě k největšímu odběru elektřiny třikrát denně. Poprvé po šesté hodině, když začíná ranní směna a pracovníci spouští tovární stroje. Jedná se o nejvyšší výkyv. Dále okolo osmnácté hodiny, kdy narůstají nároky na elektrickou hromadnou dopravu a spouští se městské osvětlení. Třetí největší odběr nastává kolem dvaadvacáté hodiny, kdy se v rámci levnější noční elektřiny spouští bojlerů anebo např. akumulární kamna. Spouštění těchto zařízení je řízeno pomocí signálních spínačů kdy dodavatel energie zašle signál do zařízení v domácnostech a ta připojí již zmíněný bojler nebo akumulární kamna. Tato zařízení se mohou připojit i během dne, když je v síti přebytek energie a elektrárny jej potřebují vyrovnat. Jedná se o jeden z globálních prostředků akumulace energie. Naopak nejnižší spotřeba elektřiny je mezi půlnocí a pátou hodinou, protože okolo půlnoci je již většina akumulárních zařízení nabitá a odpojují se od sítě.

Hlavní zatížení sítě vykrývají jaderné a tepelné elektrárny. Jejich využití nejen v době nejvyššího odběru elektřiny je dáno jejich pomalou odezvou na regulaci a vysoké závislosti účinnosti na změně výkonu. Pokud vzroste odběr elektrické energie nad jejich současný výkon, připojí se akumulární a přečerpávací elektrárny a do jisté míry také závodní

elektrárny patřící velkým podnikům. Z části mají na tomto základním dodávaném výkonu podíl i velké průtočné hydroelektrárny, které dokáží vykrývat výkyvy v síti.

V dnešní době se ve velké míře na výkonu sítě podílí obnovitelné zdroje. Jejich závislost na počasí vytváří v síti velké výkyvy. Navíc se jejich počet rok od roku zvyšuje a proto je potřeba hledat možnosti vyrovnávání těchto výkyvů. Technologií pro uchování energie je dnes nepřeberné množství, ale každá má své hranice a nedostatky kvůli nimž je můžeme použít jen v určitých aplikacích, nebo je musíme kombinovat s více typy.

2.4 Rozdělení akumulčních systémů

Akumulační systémy jsou v literatuře rozdělovány různě, např. dle okamžitého výkonu, dle velikosti okamžité kapacity nebo dle formy ukládání energie. Tato práce je zaměřena na rozdělení dle formy ukládání energie.

Akumulační systémy můžeme rozdělit dle formy ukládání energie na:

- a) mechanické:
 - a. setrvačníky,
 - b. přečerpávací vodní elektrárna,
 - c. CAES,
- b) elektrické:
 - a. kondenzátory,
 - b. super kondenzátory,
 - c. supravodivé technologie,
- c) elektrochemické:
 - a. klasické akumulátory s elektrolyty,
 - b. průtokové baterie,
 - c. palivové články,
- d) chemické ukládání energie:
 - a. vodík,
 - b. biopaliva,
 - c. syntézní plyny,
 - d. syntetický metanol,

e) tepelné:

- a. přírodní materiály v pevném skupenství,
- b. moderní roztavené soli, kryogenika, eutektické materiály.

2.4.1 Mechanické akumulátory

Jedná se o přeměnu elektřiny v mechanickou formu energie. Tento způsob uchovávání elektrické energie využívá především setrvační, deformační nebo tlakové síly.

Setrvačnickové systémy

Jedná se o historicky první akumulátor energie používaný již tisíce let před Kristem. Při výrobě nádobí používali hrnčíři otočný stůl, který poháněli nohou na spodním kotouči. Stůl si napřed roztočili, a aniž by dále točili, mohli pracovat, protože stůl jim pomalu předával kinetickou energii zpět používanou pro rovnoměrné tvarování nádobí. Dnes setrvačnickové systémy pracují např. pro vyrovnávání chodu spalovacích motorů, mechanických lisů a jiných strojů.

Setrvačnickový akumulátor je tvořen hřídelí, setrvačnickým kolem, alternátorem, magnetickými a mechanickými ložisky. Mechanická ložiska slouží pouze jako záloha, pokud by selhaly ložiska magnetická. Pro co nejmenší odpor se setrvačnickové akumulátory ukládají do skříně, ve které se udržuje vakuum nebo do nádoby napuštěné heliem.

Pokud chceme do setrvačnicku uložit energii, musíme alternátor připojit do sítě. Poté se alternátor chová jako synchronní motor a roztáčí setrvačnick. Tímto se přebytečná energie ukládá v kinetické formě do setrvačnicku. Pokud setrvačnick odpojíme od sítě, začne alternátor pracovat jako generátor a přeměňuje nám zpět energii kinetickou na energii elektrickou. Kapacitu setrvačnicku udávají dvě hodnoty a to hmotnost setrvačnickového kola a jeho rychlost otáčení.

Dnes se upouští od provedení s těžkým a pomalu se točícím setrvačnickem a naopak nízká hmotnost setrvačnicku se kompenzuje rychlostí otáčení. Tímto vzniká nárok na použití lepších (kompozitních) materiálů, které mají vyšší pevnost v tahu. Čím vyšší je

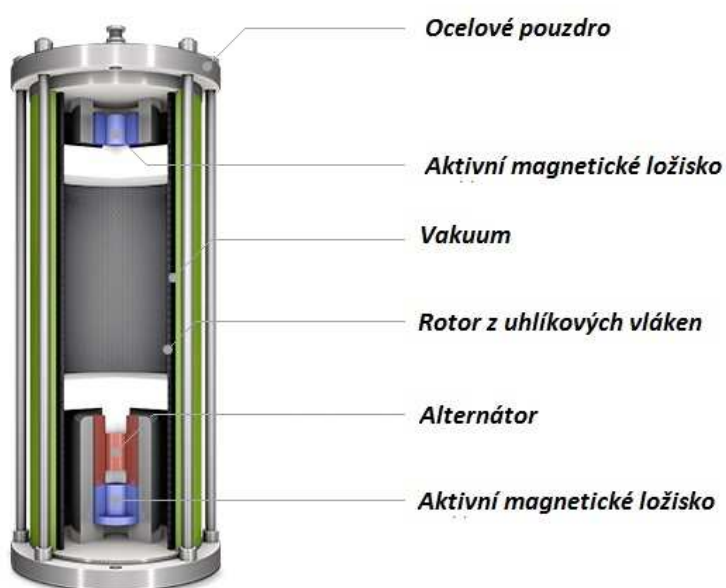
rychlost, tím je zapotřebí lepších a dražších materiálů pro výrobu setrvačníku a ostatních komponentů.

Energie setrvačníku roste s druhou mocninou frekvence, čili počtem otáček za jednotku času. Setrvačník není konstruován jako přenosný akumulátor. Pokud se nachází v nabitém stavu, má setrvačník tendenci držet si svou rovinu otáčení, která se velmi obtížně mění. Této zdánlivé nevýhody je využíváno u gyroskopu letadel, kde si roztočený setrvačník drží pořád stejnou polohu a díky tomu piloti letadla znají přesné natočení a naklonění letadla.

Mnohdy se setrvačníky používají u velkých výrobních procesů řízených počítačem. Akumulátor zajistí velký výkon zálohy, ale pouze po krátkou dobu. Avšak ta postačí pro ukončení rozběhnutých procesů, nebo vyplnění doby mezi výpadkem elektrické energie a náběhem generátoru.

Výhodou setrvačníku je možnost nabíjení malým příkonem, což je využíváno zejména u nestálých a nepříliš výkonných obnovitelných zdrojů. Vlastní spotřeba setrvačníku je od dob používání magnetických ložisek minimální. Hlavní omezení setrvačníku spočívá v použité výkonové elektronice, která ovlivňuje jeho celkový chod.

Obr. 2.1 Setrvačník [19]



Přečerpávací vodní elektrárny

Přečerpávací vodní elektrárny patří mezi velmi využívané systémy velké energetiky. Jejich princip je založený na rozdílné výšce dvou nádob, které jsou mezi sebou spojeny potrubím. Spodní nádoba je obvykle přehradní nádrž pracující jako průtočná elektrárna. Horní nádrž je uměle vytvořena na nejbližším vrcholu. Výjimkou jsou vysokohorská jezera, která při propojení tunelovou šachtou simulují stejnou funkci. Spád by se měl pohybovat od 100 do 500 m.

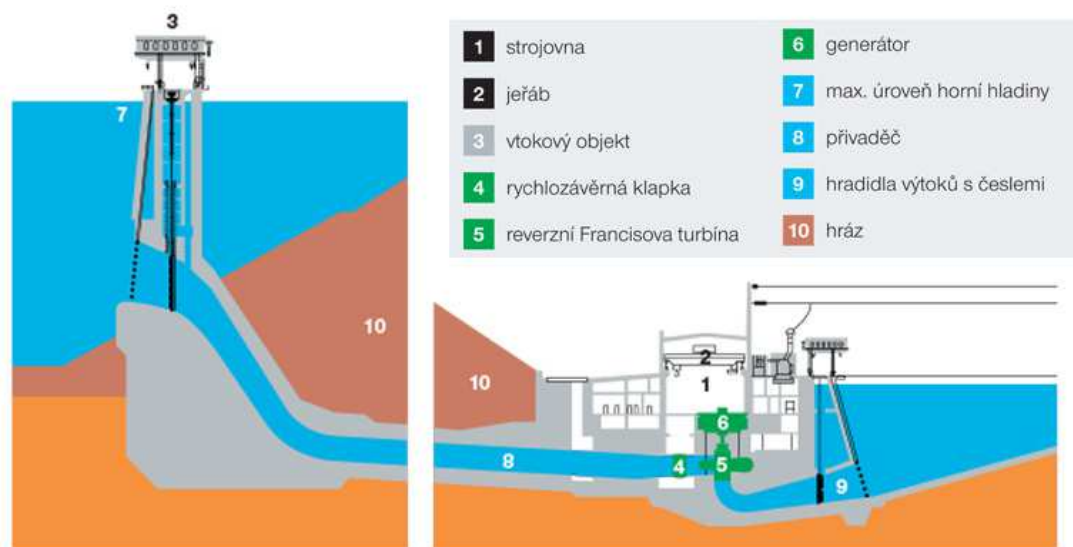
U spodní nádrže je postavená strojovna, která obsahuje turbínu připojenou na dynamo a čerpadlo, nebo reverzní turbínu připojenou k alternátoru, která zastupuje jak turbínu, tak čerpadlo. Pokud máme v síti přebytek energie, napájí se alternátor ze sítě a čerpá vodu do horní nádrže. Tím předá vodě kinetickou energii, která se se zvyšující se výškou a následným uložením v horní nádrži, mění na energii potenciální. Tímto dochází k akumulování energie.

Jakmile v síti dojde k poklesu energie, spouští se v přečerpávací vodní elektrárně opačný chod. Otevřou se ventily a uvolněná voda dopadá na turbínu, která se roztáčí a pohání alternátor. Takto může být síť vyrovnávána až několik hodin. Najetí elektrárny je velmi rychlé, trvá pouze desítky sekund.

Účinnost starších zařízení se pohybovala mírně nad 50 %. Nové reverzní turbíny se pohybují okolo 75 %. V naší republice najdeme 3 přečerpávací elektrárny, z nichž největší jsou Dlouhé stráně. Tato elektrárna disponuje dvěma Francisovými reverzními turbínami, přičemž každá je o výkonu 200 MW. Ve světě je mnoho gigantických staveb, které svým akumulačním výkonem dosahují až tisíce MW.

Velkou roli hraje u přečerpávacích elektráren spád. Pokud by se dokázal zvýšit spád ze 100 na 1000 m, mohlo by se při stejném výkonu zmenšit množství obíhající vody na desetinu. Díky tomu by se mohly zmenšit i rozměry nádrží a tedy i stavební náklady. Tímto by se odstranila velká nevýhoda vodních přečerpávacích elektráren, a sice jejich obrovský zásah do krajiny, což je jeden z důvodů proč jich v ČR není postaveno více. Nicméně dosažení takového spádu je velmi obtížné i ve státech, kde je hornatá krajina.

Obr. 2.2 Schéma vodní přečerpávací elektrárny [12]



Tlakovzdušné systémy CAES

První uvedení tlakovzdušného systému do provozu proběhlo v roce 1974 v německém Huntorfu. Systémů na akumulaci energie za pomoci tlakového vzduchu existuje celá řada. Liší se hlavně způsobem, jakým bude stlačený vzduch přeměněn zpět na energii elektrickou. Dalším rozlišujícím faktorem tlakovzdušných systémů je druh použité tlakové nádoby. Buď se může jednat o velkou jeskyni případně vyčerpané ložisko zemního plynu, nebo v případě decentrálních zdrojů se většinou používají kovové tlakové nádrže.

Hlavní princip tlakovzdušných akumulčních systémů je založen na tom, že přebytečná energie pohání kompresor, s jehož pomocí stlačujeme vzduch do vzduchotěsné tlakové nádoby. Takto uchovávaná energie se využívá při velkém odběru elektřiny ze sítě.

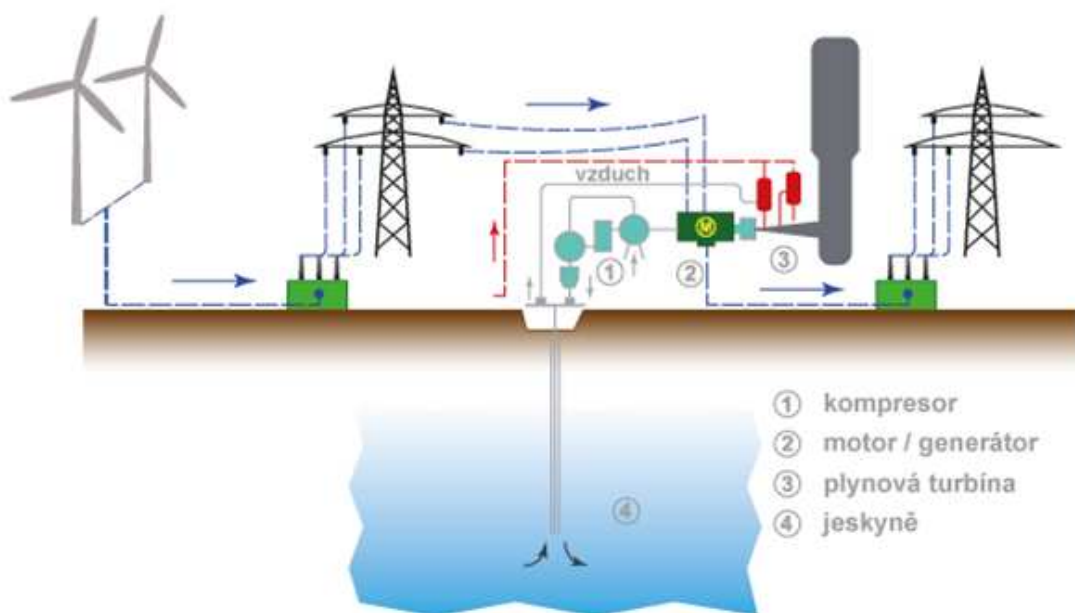
Nejzákladnější tlakovzdušné systémy se používají u elektráren využívajících spalovací turbínu. Spalováním plynu, ke kterému je zapotřebí stlačený vzduch o určité teplotě a tlaku, vznikají spaliny, čímž se pohání turbína, která pohání alternátor. Nicméně musí pohánět také kompresor, který si dokáže vzít až 2/3 vyrobené energie.

V době nedostatku energie, je možno začít dodávat do spalovací komory stlačený vzduch z nabitého vzduchového zásobníku. Tím vzniká možnost pomocí spojky odpojit kompresor, který je na stejné hřídeli jako turbína a generátor. Odpojením takovéto zátěže rázem dostáváme na generátoru až o 2/3 více energie.

Nejjednodušší systém je znázorněn na obr. 2.3, který využívá pouze jeden kompresor, jež je součástí elektrárny se spalovací turbínou. Může však být použit i systém s dvěma kompresory, zaručující nezávislost akční části od akumulární. A naopak může být systém CAES zapojen i s mnohem složitějšími kogeneračními systémy (viz další kapitola).

Jednou z velkých nevýhod systému CAES oproti přečerpávacím elektrárnám je jejich velká ztráta tepelné energie během komprese, která tomuto systému ubírá na celkové účinnosti. Tento problém je však řešitelný, viz 3. kapitola.

Obr. 2.3 Elektrárna se spalovací turbínou se systémem CAES [21]



2.4.2 Elektromagnetické akumulátory

Jedna z velkých výhod elektrických akumulátorů je, že nedochází ke změně formy energie. Elektrická energie je uložena ve formě elektrického náboje, který je udržován za použití magnetické síly.

Kondenzátory

Kondenzátor je složen ze dvou elektrod neboli vodivých desek, které jsou mezi sebou odděleny dielektrikem. Na elektrody je přiváděn díky elektrostatické indukci stejně velký elektrický náboj opačné polarity, čímž se k sobě elektrody začnou rovnoměrně přitahovat. Aby však nedošlo k neutralizaci náboje, nesmí se elektrody vzájemně dotknout nebo přiblížit se na mez přeskočků výboje, čemuž zabraňuje dielektrikum, které je mezi nimi. Dielektrikum díky své polarizaci snižuje sílu elektrického pole nábojů na elektrodách a tím zvětšuje kapacitu kondenzátoru. Kondenzátory se nejčastěji používají v elektronice u operačních pamětí počítačů.

Superkondenzátory

Hlavní schopností superkondenzátorů je v malém čase pojmout velké množství náboje. Konstrukce superkondenzátoru se blíží chemickému způsobu akumulace energie, ale zároveň se chová jako normální kondenzátor. Elektrický náboj je držen elektrostatickou silou na povrchu uhlíkových elektrod. Elektrolyt je na vodní bázi, nebo na bázi organického rozpouštědla. Napětí se pohybuje od 1 V do 3 V.

Superkondenzátory nepoužíváme jako zdroj dlouhodobé dodávky energie kvůli jejich samovybití a malé kapacitě. Využívají se pro krátkodobé vykrytí nedostatků energie v době špičky nebo pro překlenutí doby mezi výpadkem sítě a najetím záložního systému.

Supravodivé indukční akumulátory

Na možnost supravodivosti přišel již roku 1911 nizozemský fyzik Kammerlingh Onnes. Při pokusech se smyčkou rtuti zmražené v kapalném heliu upozoroval, že i po

odpojení induktoru protékal ve smyčce elektrický proud a to dokonce několik týdnů. Supravodivost je stav, kdy v látkách zcela vymizí elektrický odpor. Dnes umíme supravodivost vyvolat v mnoha kovech, slitinách dokonce i v keramice a to i v teplotách kapalného dusíku či vodíku. V továrnách na mikrosoučásti bylo již zprovozněno několik takovýchto akumulátorů a to především tam, kde je velký nárok na stabilitu proudu. První takovéto zařízení bylo vyrobeno s pracující supravodivou cívkou ponořenou do kapalného helia nabíjenou přes usměrňovač, čímž bylo dosaženo minimálních ztrát.

Tyto akumulátory mají rychlou reakci na výpadek a to okolo 0,2 mikrosekundy. Proud je z cívky pomocí indukce převeden přes kondenzátor do induktoru. Takovýto akumulátor je chopen dodávat výkon až 1 MW a zároveň zvládá spoustu cyklů nabití a vybití. Nabíjení je velmi krátké a účinnost dosahuje až 95 %. Podle studií se tento způsob akumulace bude moci svou kapacitou za pár desítek let rovnat kapacitě uchované energie ve vodních přečerpávacích elektrárnách.

2.4.3 Elektrochemické akumulátory

Jedná se o jeden z nejstarších způsobů akumulace elektrické energie. Elektrochemické akumulátory jsou součástí mnoha automobilů. První takovýto akumulátor byl vynalezen roku 1859 francouzským fyzikem G. R. Planté.

Olověné akumulátory

Tyto akumulátory se skládají z páru olověných desek, které jsou ponořeny do kyseliny sírové. Na deskách nenabitého akumulátoru se díky účinkům kyseliny usazuje síran olovnatý PbSO_4 . Pro nabití akumulátoru se připojí stejnosměrné napětí a na kladné elektrodě se začne vytvářet červenohnědý oxid olovičitý PbO_2 . Záporná elektroda se obalí tmavě šedou vrstvou houbovitého olova. Elektrolyt začne houstnout a na svorkách elektrod je možno naměřit napětí 2,1 V. Po kompletním nabití vznikne galvanický článek. Pokud je na elektrody připojena zátěž, začne probíhat opačná chemická reakce než je nabíjení a akumulátor se začne vybíjet.

Napětí na svorkách je možno regulovat počtem párů destiček, které jsou mezi sebou vzájemně propojeny. Tímto je možno dostat 6 V, 12 V, 24 V nebo až 48V. Olověné akumulátory dosahují účinnosti okolo 80 % a vydrží až 500 nabíjecích cyklů. Po nabití a následném vybíjení nesmí napětí klesnout pod příslušnou mez. Nevýhodou je, že olověné akumulátory jsou velmi náchylné na úplné vybití, přičemž opakované nabíjení by již nebylo tak efektivní nebo nemusí být vůbec možné. Další velkou nevýhodou je jejich velikost.

Ačkoliv se tyto baterie přestávají globálně používat, jsou oblasti, ve kterých jsou nenahraditelné. Oproti novým typům baterií mají totiž vysokou odolnost vůči nízkým teplotám, disponují vysokou bezpečností a nízkou pořizovací cenou.

Chemické akumulátory druhé generace

Další generace elektrochemických akumulátorů nijak razantně nemění princip akumulace, mění se pouze druhy použitých materiálů elektrod a složení akumulací náplně.

Nikl – ocelové akumulátory (NiFe) byly vynalezené T. A. Edisonem již před sto lety. Postupem času byly zdokonalovány až do dnešní podoby. Niklové a ocelové destičky jsou střídavě ponořeny do elektrolytu na bázi hydroxidu sodného (KOH). Díky jejich konstrukci jsou odolnější otřesům, a tak tedy nic nebránilo použití těchto baterií v přenosových elektronických zařízeních, jako jsou počítače, mobily, kamery, atd. Jejich kapacita je několika násobně vyšší než kapacita ocelových akumulátorů. Nejvyšší řady takovýchto akumulátorů dokáží akumulovat až třináásobek olověných akumulátorů. Avšak jejich cena je velmi odlišná kvůli převážnému použití vzácných kovů.

Další řadou baterií jsou nikl – kadmiové baterie (NiCd) používané pro mobilní elektroniku a průmyslové nářadí. Články jsou vyráběny o napětí 1,2 V a jejich hlavní výhodou jsou rychlé nabíjení a možnost až tří tisíc nabíjecích cyklů. Naopak jejich největší nevýhodou je, že trpí tzv. paměťovým efektem. Pokud baterii před nabitím zcela nevybijeme, může se razantně snížit její kapacita. V dnešní době jsou však již NiCd baterie nahrazovány jinými druhy baterií a to kvůli jejich obsahu kadmia. Místo nich jsou využívány nikl – metalhydridové (NiMH) a lithiiumiontové (Li-Ion) baterie vykazující

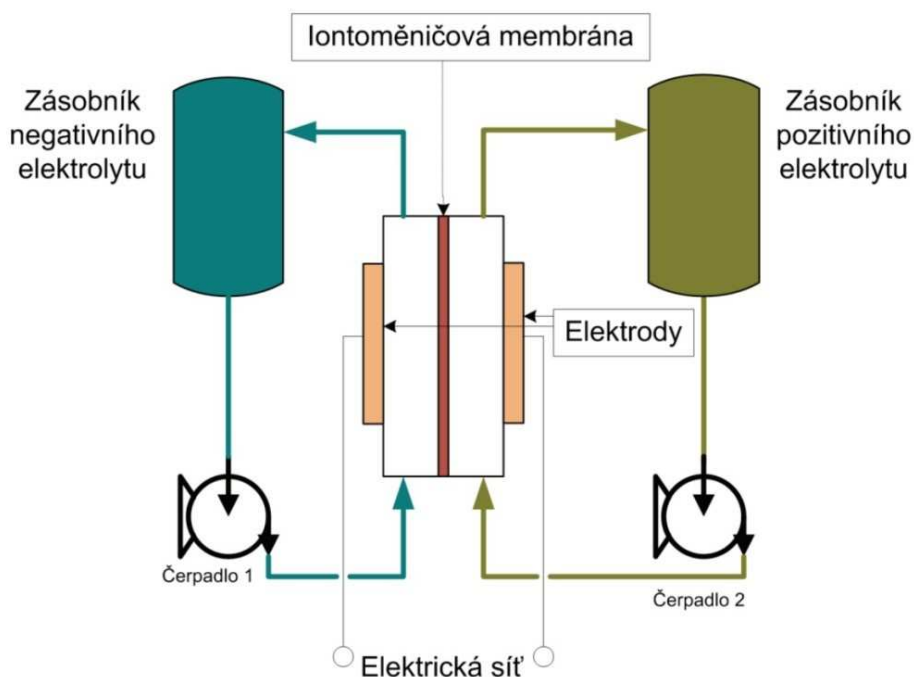
tříkrát větší kapacitu než baterie NiCd. Tyto baterie již netrpí paměťovým efektem ani samovybíjením.

Dnešní vývoj se zabývá například zinko – vzdušnými akumulátory používaných pro pohon elektro automobilů nebo sodíko - sírové akumulátory, které pracují až při teplotě 300 °C a dokáží dodávat tříkrát větší výkon než akumulátory olověné.

Průtokové baterie

Průtokové baterie se skládají ze dvou zásobníků elektrolytu proudícího elektrochemickým článkem. Množství energie je dáno množstvím elektrolytu v nádobách a výkon je závislý na rychlosti reakce na elektrodách. Účinnost se kolísá okolo 80 %. Napětí se pohybuje od 1,4V do 2V. Průtokové baterie disponují vysokou kapacitou, a proto jsou vhodné pro dlouhodobou zálohu.

Obr. 2.4 Průtoková baterie [15]

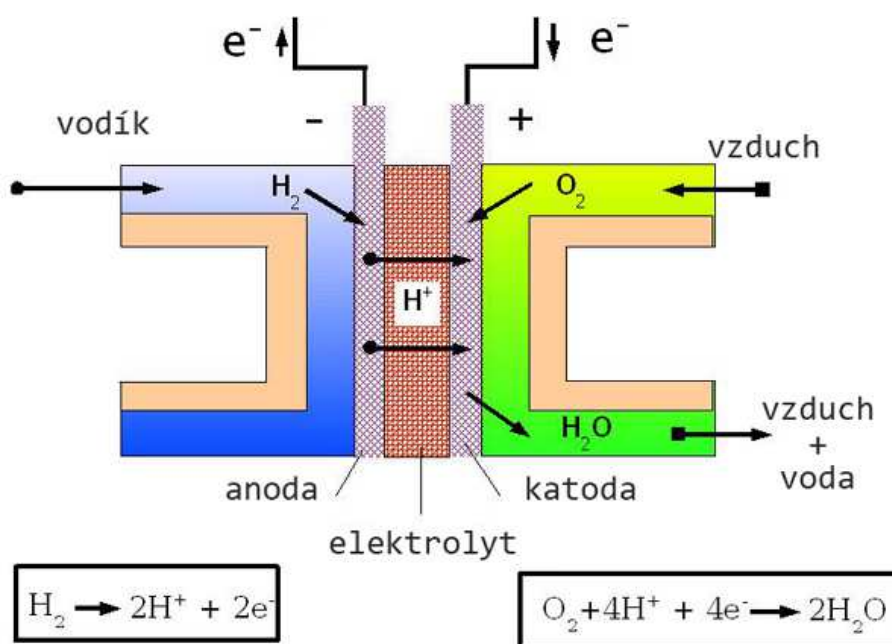


2.4.4 Chemické akumulátory

Chemické akumulátory jsou velmi dobré pro dlouhodobou akumulaci energie. Můžeme se o tom přesvědčit u jakýchkoliv fosilních paliv, mezi které patří černé a hnědé uhlí, zemní plyn, atd. Chemická paliva vytváříme nejčastěji pomocí elektrolýzy suchou nebo mokrou anaerobní fermentací.

Pro vysvětlení principu akumulace do chemické formy energie je použit převod elektrické energie na zkapalněný vodík za pomoci elektrolýzy vody. K elektrolýze je potřeba nádoba naplněná vodou a dvě elektrody. Při přebytcích energie jsou elektrody připojeny k síti, čímž se na anodě vylučuje kyslík a na katodě vzniká vodík, který je uložen do zásobníku. V případě potřeby je možný uložený vodík spálit, čímž je roztáčena spalovací turbína, nebo je uložený vodík, jakožto palivo, přiváděn do palivového článku na anodu a na katodu je přiváděno okysličovadlo ve formě vzdušného kyslíku. Tímto způsobem je převedena chemická energie přímo na energii elektrickou.

Obr. 2.5 Palivový článek [11]



Velkou výhodou je možnost provádění elektrolýzy za vysokého tlaku, přičemž na výstupu dostáváme zkapalněný vodík. Největší nevýhodou ukládání energie ve formě vodíku je malá účinnost, která se pohybuje okolo 50%. A taktéž skladování vodíku je velmi obtížné, protože při jakékoli netěsnosti vodík uniká a vytváří se vzduchem výbušnou směs.

2.4.5 Tepelné akumulátory

Jedním z nejjednodušších příkladů tepelné akumulace je akumulace ve vodních zásobnících, např. v bojlerech. Mnoho těchto zařízení je k síti připojeno pouze v noci v rámci levnějšího tarifu pomocí signálních spínačů. Této akumulace využívají elektrárny, které při přebytku energie přepnou denní tarif na noční a tím dají signál již zmíněným signálním spínačům, který sepnou bojler.

Další tepelné akumulace probíhají ve většině případů bez převodu elektrické energie na tepelnou. Tento převod je možný pomocí elektrických topných spirál, avšak nejedná se o ekonomicky vhodný způsob, kvůli nízké účinnosti. Uchovat teplo lze v pevných přírodních materiálech, např. ve šterku nebo v moderních kapalných médiích jako jsou roztavené soli. Avšak tyto způsoby akumulace slouží k uchovávání tepla, nikoliv elektrické energie.

2.5 Důležité ukazatele kvality akumulačních zařízení a jejich porovnání

Ke správné volbě akumulačního zařízení je nutné znát parametry použití jednotlivých technologií.

Parametry pro výběr technologie:

- a) specifická hustota energie [Wh/kg], která značí množství energie na jednotku hmotnosti nebo objemu,
- b) měrný výkon [W/kg], který udává výkon v 1 kilogramu uchované energie,
- c) účinnost [%], která značí poměr vstupní energie k energii výstupní,
- d) samovybíjení,
- e) životnost, která značí maximální počet nabíjecích cyklů,
- f) celková účinnost, která udává poměr celkové vstupní energie k celkové výstupní energii,
- g) objemová energetická kapacita, která udává velikost zařízení. Jedná se o množství vložené energie na jednotku objemu,

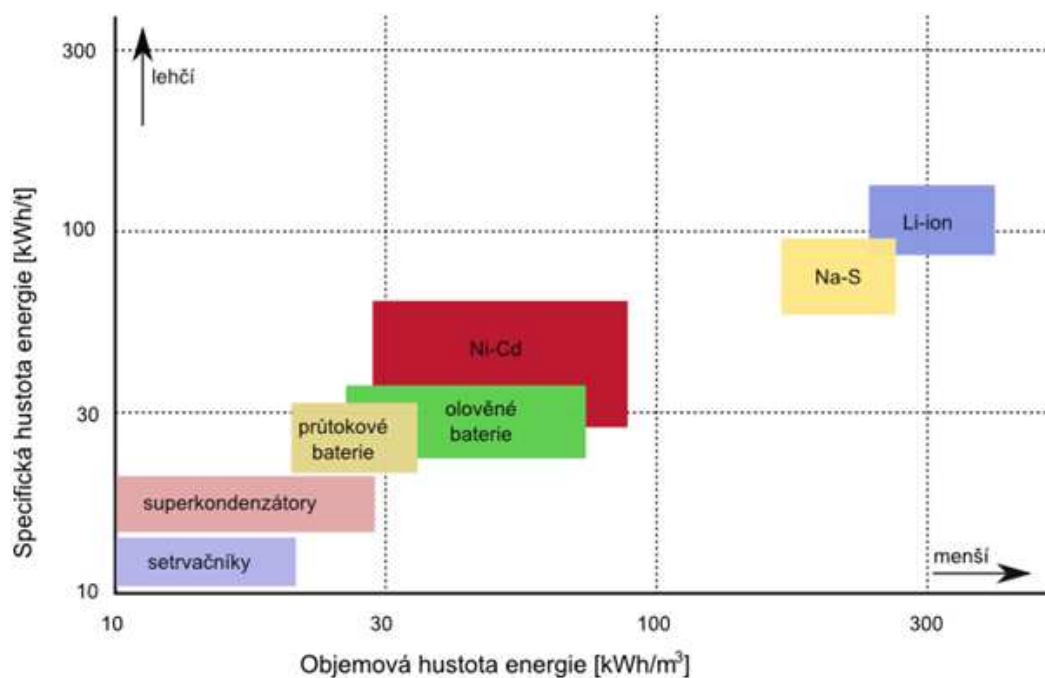
- h) doba reakce je čas, který udává, jak rychle dokáže akumulční jednotka začít dodávat energii do sítě,
- i) rychlost akumulace neboli doba za jakou se akumulční článek nabije na maximální hodnotu,
- j) doba akumulace udává, jak dlouho dokáže zařízení udržet energii bez větších ztrát,
- k) vliv na životní prostředí.

Tab. 2.1 Srovnání hlavních výhod a nevýhod zmíněných způsobů akumulace energie

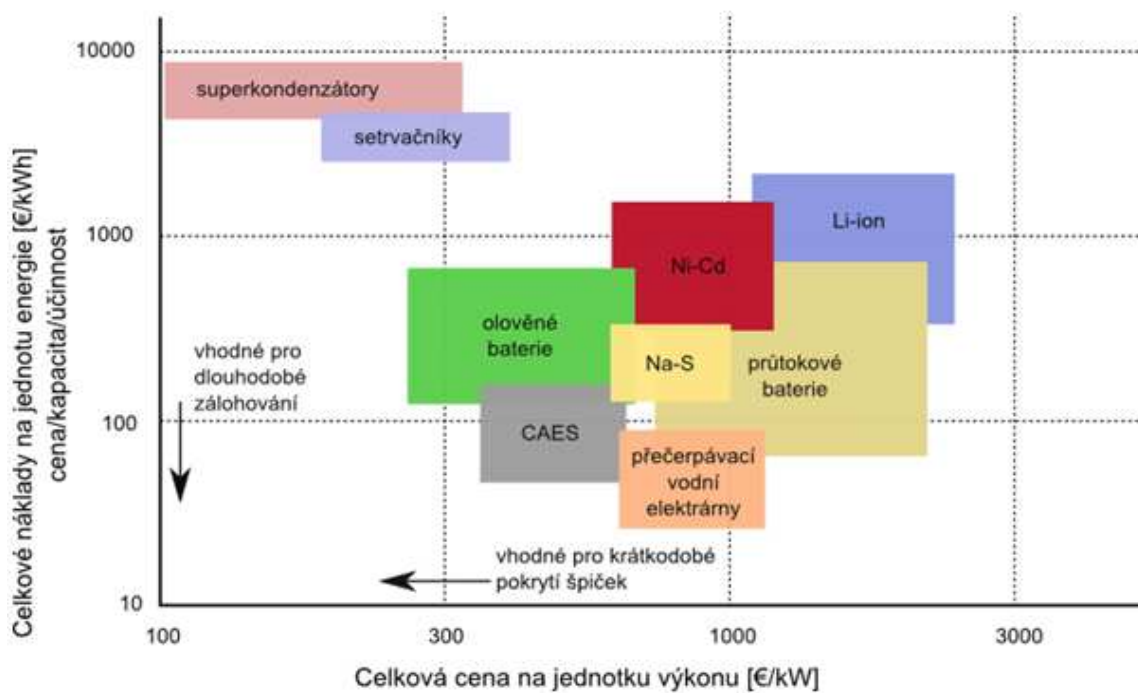
Akumulátory	Výhody	Nevýhody
Setrvačnick	Vysoký výkon a rychlá odezva	Nízká kapacita
Přečerpávací vodní elektrárny	Vysoká kapacita i výkon a nízká cena energie	Velký zásah do krajiny a vysoká pořizovací investice
CAES	Vysoká kapacita i výkon a nízká cena energie	Nutnost speciálních místních podmínek
Kondenzátory	Velmi pohotové vyrovnávání sítě	Nízká kapacita
Superkondenzátory	Vysoká účinnost, mnoho cyklů nabíjení a vybíjení	Nižší energetická hustota, samovybíjení
Supravodivé technologie	Vysoká účinnost, rychlá odezva, vysoká kapacita a výkon	Vysoká pořizovací cena
Klasické akumulátory	Nízká cena	Malá životnost a možnost poruchy hloubkovým vybitím
Průtokové baterie	Vysoká kapacita a nízké náklady	Nízká energetická hustota
Palivové články	Přímý převod z energie chemické na energii elektrickou	Nízká účinnost
Tepelný akumulátor	Jednoduchá konstrukce	Rozšířenější použití pouze s jiným druhem akumulace
Chemické ukládání energie	Téměř žádné ztráty akumulované energie	Nižší účinnost během elektrolýzy

Každá výrobní firma potřebuje jiný druh akumulace elektřiny, a proto nelze vybrat jeden univerzální akumulátor. Velmi těžko by se hledala technologie akumulace elektřiny, která by pokryla veškeré požadavky sítě a současně aby si zachovala své optimální parametry.

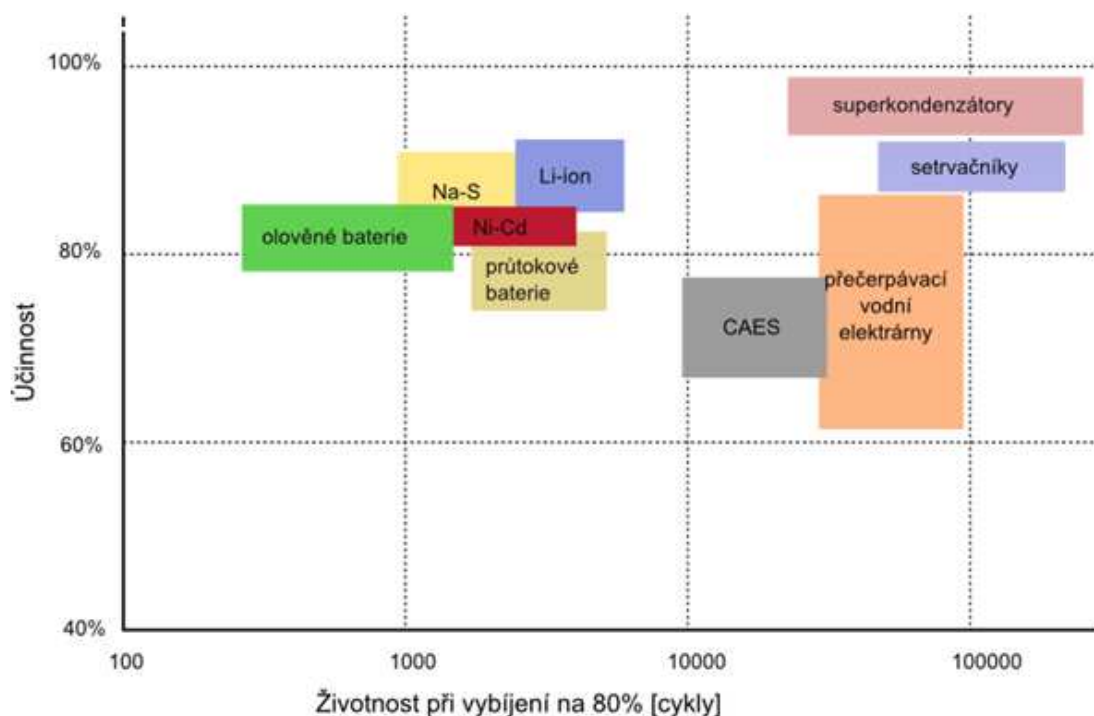
Graf 2.1 Srovnání akumulčních prostředků v závislosti na hustotě energie [21]



Graf 2.2 Srovnání akumulčních prostředků v závislosti na nákladech [21]



Graf 2.3 Srovnání akumulčních prostředků v závislosti na účinnosti a životnosti [21]



Na základě výše uvedených grafů nelze jednoznačně určit univerzální nejvýhodnější způsob akumulace energie. Vždy je třeba zvážit, které hodnoty jsou upřednostňovány, např. kapacita nebo výkon a podle toho se rozhodnout. Např. systém CAES je vhodný, pokud je požadováno snížení nákladů na jednotku energie. Avšak nevýhodou je, že samotný systém CAES má oproti ostatním systémům nižší účinnost. Tento problém je možné řešit přidáním dalších komponentů, viz další kapitola.

3 Popis tepelného schéma akumulace elektřiny v tlakovém vzduchu

Ke zpracování této kapitoly byly využity tyto zdroje [8, 9, 16, 24]

Existuje mnoho způsobů akumulace energie, avšak tato diplomová práce se zabývá technologií akumulace energie CAES, čili akumulací energie v tlakovém vzduchu. Tato technologie byla zvolena hlavně kvůli tomu, že poskytuje dostatečný výkon a kapacitu, která by se mohla rovnat velkým přečerpávacím elektrárnám. Tato technologie se v současné době využívá u velkých elektráren dosahujících výkonů 100 až 300 MW, přičemž doba akumulace je v desítkách hodin.

3.1 Rozdělení systému CAES dle základní technologie zapojení

Systém CAES lze rozdělit na tři podskupiny dle základní technologie zapojení. Jedná se o akumulární elektrárnu CAES, elektrárnu se spalovací turbínou a přídavným systémem CAES a o elektrárnu se spalovací turbínou a přídavným systémem CAES s vlastním akumulárním kompresorem.

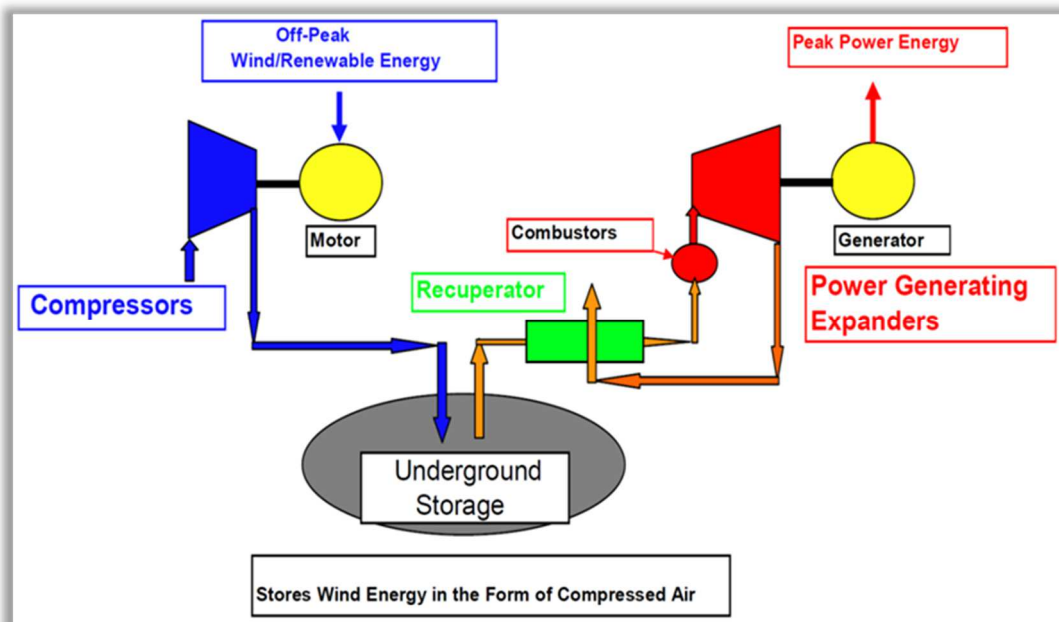
Akumulační elektrárna CAES

Tento typ zapojení elektrárny pracuje, pouze pokud je elektrická síť mimo své optimální hodnoty. Celý systém se skládá ze dvou částí. Akumulační část se skládá z tlakovzdušného zásobníku a akumulárního kompresoru, který je poháněn motorem. Vybíjecí část se skládá ze spalovací komory, přívodu plynu, ohříváku plynu, spalovací turbíny, generátoru a jednotek pro čištění spalin.

V případě přebytku energie v síti je napájen motor, který pohání kompresor. Ten začne odebírat a stlačovat vzduch do podzemního zásobníku nebo jiné velké tlakové nádoby, čímž je energie uchovávána ve formě stlačeného vzduchu a v síti jsou vyrovnány přebytky. Naopak v případě nedostatku energie je spuštěn opačný chod, při kterém je využívána druhá část akumulární elektrárny. Do spalovací komory je vháněn zemní plyn a

naakumulovaný stlačený vzduch ze zásobníku, čímž vzniknou spaliny o vysokých teplotách a velkém tlaku. Tyto spaliny roztáčí turbínu, která je hřídelí spojena s elektrickým generátorem, jež následně přivádí elektrickou energii do sítě. Doba najetí elektrárny je v řádech několika minut.

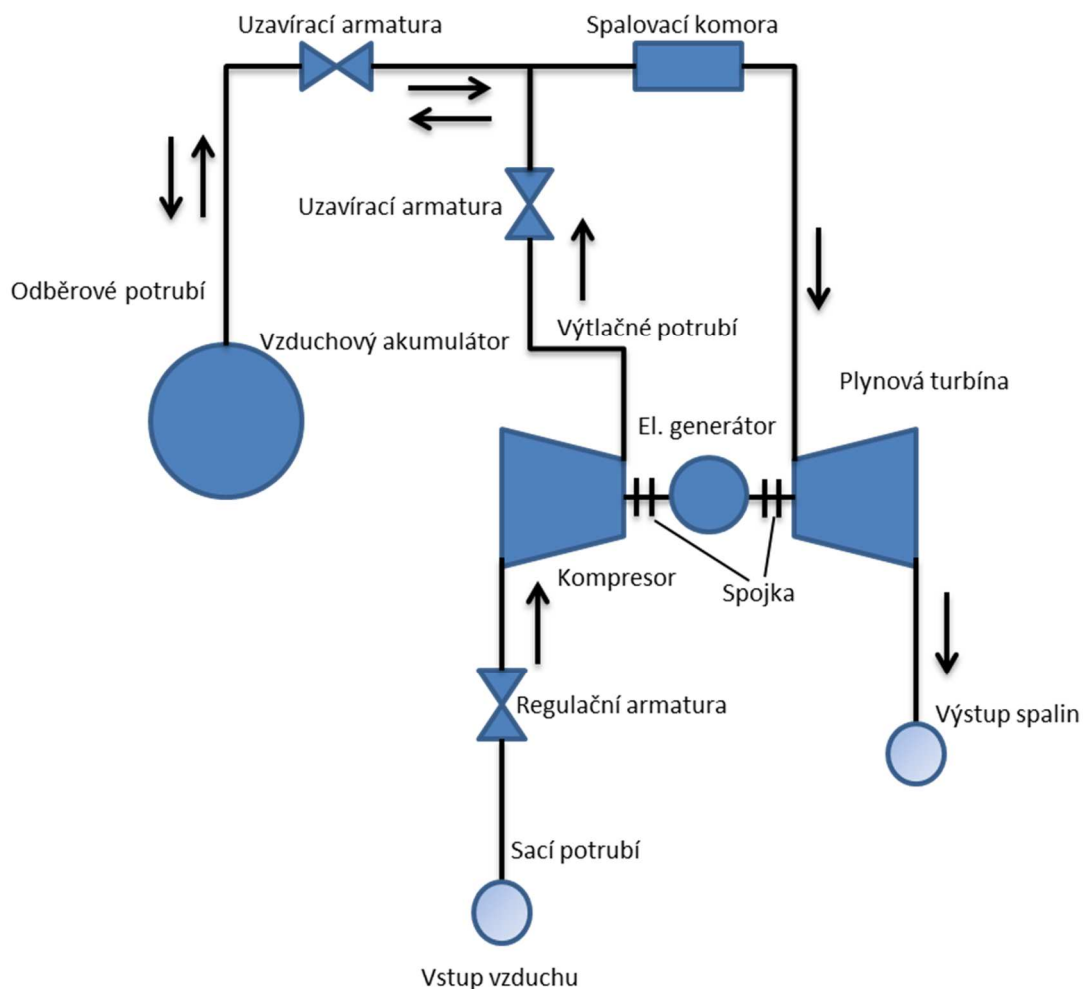
Obr. 3.1 Schéma akumulční elektrárny CAES [24]



Elektrárna se spalovací turbínou a přídavným systémem CAES - Varianta akumulční elektrárny s jedním kompresorem

Tato elektrárna se od předchozí liší svou využitelností nejen při akumulaci energie, ale i při její výrobě v rámci pokrytí základního výkonu energetické sítě. Zjednodušeně řečeno je hlavním rozdílem oproti předchozímu zapojení přidání kompresoru na hlavní hřídel, která spojuje turbínu s generátorem. Ve skutečnosti se jedná o plnohodnotnou elektrárnu s plynovou turbínou nebo o kogenerační zdroj, ke které je připojena akumulční nádoba s množstvím uzavíracích armatur. Výhodou tohoto systému je možnost jeho dodatečného připojení do již spuštěných elektráren. Rozdílem oproti první variantě je absence akumulčního kompresoru.

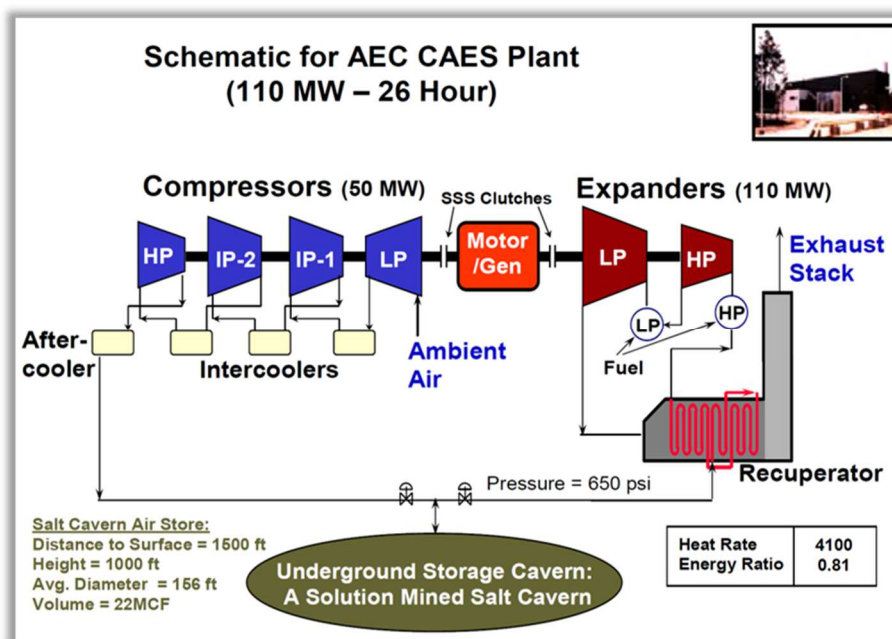
Obr. 3.2 Systém CAES [vlastní zpracování]



Elektrárna vyrábí energii pro základní dodávku energie v síti, avšak pokud je energie přebytek, začne elektrárna energii akumulovat. Pomocí spojky je odpojena část obsahující parní turbínu a elektrický generátor je zapojen jako motor. Ten pak pohání kompresor, který plní akumulátor stlačeným vzduchem.

V případě potřeby vyššího výkonu je připojena plynová turbína a generátor se již nechová jako motor. Do spalovací komory je dodáván stlačený vzduch ze zásobníku. Díky tomu je možno pomocí spojky odpojit stávající kompresor, který spotřebovává až 2/3 energie. Tato uvolněná energie je poté využita v generátoru, čímž je umožněno vyrábět větší množství elektrické energie.

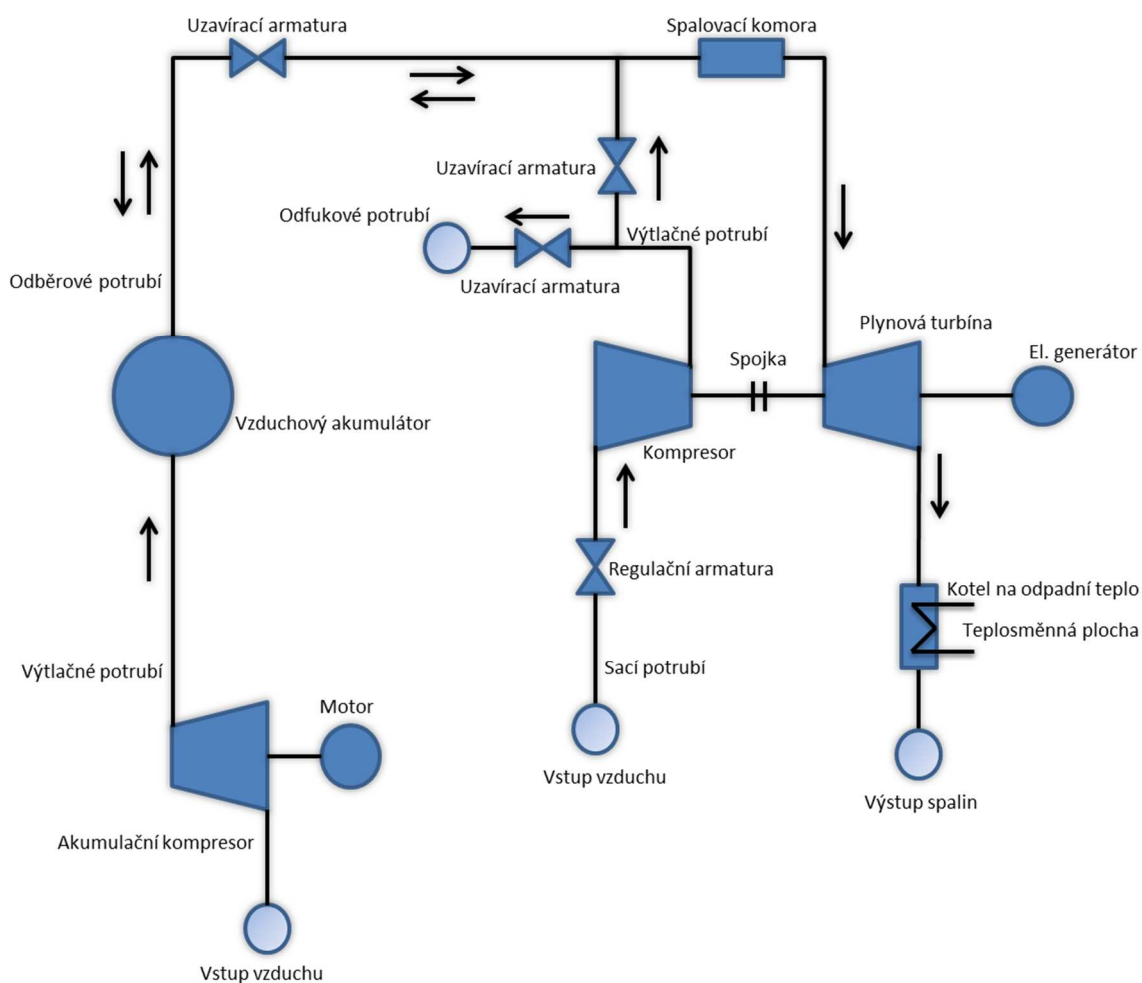
Obr. 3.3 Reálné zapojení elektrárny se spalovací turbínou a přídavným systém CAES v Německém [24]



Kogenerační zdroj se spalovací turbínou a přídavným systémem CAES s vlastním akumulacním kompresorem - Varianta elektrárny s dvěma kompresory (EC-CAES)

Systém elektrárny se spalovací turbínou a přídavným systémem CAES s vlastním akumulacním kompresorem pracuje na podobném principu jako elektrárna se spalovací turbínou a systémem CAES, akorát je zde připojen samostatný akumulací kompresor. Ten umožňuje akumulaci energie i během výroby elektrické energie, přičemž obě části pracují nezávisle na sobě.

Obr. 3.4 Schéma elektrárny se spalovací turbínou a systémem EC - CAES s vlastním akumulčním kompresorem [vlastní zpracování]



Této možnosti je využíváno hlavně u decentralních zdrojů, které mají ve svém okolí obnovitelné zdroje, jako jsou větrné a solární elektrárny. Kdy je pomocí kogeneračního zdroje energie vyráběna a zároveň je i z obnovitelných zdrojů akumulována.

Jediná varianta, kdy nelze zajistit nezávislý chod obou částí, je v případě, že je energie vyráběna z akumulovaného vzduchu. Kompresor kogeneračního zdroje je v tomto případě opět spojkou odpojen a kogenerační zdroj je závislý na dodávce stlačeného vzduchu ze zásobníku.

3.2 Varianty akumulčních elektráren systému CAES dle využívaných technologií

Od počátků technologie CAES došlo již k mnoha inovacím. To je také důvodem existence mnoha typů rozdělení těchto akumulčních. Systémy CAES se mohou dělit na další dílčí systémy např. dle využívaných technologií.

Jejich dělení je následující:

- a) AA – CAES (Advanced Adiabatic CAES), v tomto systému se jedná o adiabatickou kompresi vzduchu s využíváním akumulovaného kompresního tepla pro spouštění a provoz plynových turbín. Tímto je umožněno dosáhnout až 70% účinnosti. Součástí této technologie je vývoj vysokoteplotních kompresorů a rekuperátorů tepla,
- b) G – CAES (General Compression Advanced Energy Storage), což je modulový systém pro výkon až 500 MW s izotermickou kompresí a expanzí vzduchu bez spotřeby zemního plynu. Účinnost dosahuje až 70 %,
- c) ICARES (Integrated Compressed Air Renewable Energy systém), tento systém neuchovává vzduch v podzemních zásobnících, nýbrž ve vacích upevněných na dně moře v hloubce přibližně 500 m,
- d) LAES (Liquid Air Energy Storage), v tomto systému není energie uskladněná ve stlačeném, ale ve zkapalněném vzduchu,
- e) ADELE (Adiabater Druckluftspeicher für die Elektrizitätsversorgung), jedná se o prototypovou elektrárnu v německém Stassfurtu,
- f) CAES s nadzemními zásobníky pro výkon až 15 MW,
- g) CAES s tlakovým médiem CO₂,
- h) EC – CAES (Energetická Centrála CAES).

3.3 Alternativa CAES pro decentralní energetické centrály s akumulací energie v tlakovém vzduchu (EC CAES)

Hlavním cílem vývoje nových technologií je dosáhnout účinnosti vyšší než 70 %. Přečerpávací elektrárny mají velkou výhodu v 80% účinnosti, nicméně se jedná o finančně náročnou investici a značný zásah do krajiny. Vzhledem k důležitosti správného výběru terénu o nich nelze uvažovat jako o lokálních zdrojích akumulované energie. Proto je pro decentralní zdroje vhodnější využít systém CAES. Protože lze jako zásobník stlačeného vzduchu využít jak velký utěsněný prostor pod zemí, tak i kovový vysokotlaký zásobník, který je možné umístit kdekoliv bez ohledu na terén.

Rozdělení vyvíjené koncepce podle konečného užití

Vyvíjené koncepce lze rozdělit na využití v rámci přenosové soustavy, využití u konečného odběratele nebo v oblasti decentralních zdrojů.

Koncepce přenosových soustav se netýká akumulace pouze vlastní výroby energie a její spotřeby, ale vztahuje se na celou přenosovou síť. Jedná se o vyrovnávání špičkového výkonu ve stovkách MW po dobu několika hodin. Tento výkon je v současnosti velmi závislý na produkci obnovitelných zdrojů, která je řízena pouze počasím. Vyrovnávání přenosové soustavy je zajišťováno vodními nebo přečerpávacími elektrárnami a zároveň technologií CAES.

Koncepce využití u konečného odběratele se opět týká elektrické energie vyráběné pomocí obnovitelných zdrojů. Pokud je elektrická energie vyráběna lokálně, nejčastěji solárními nebo větrnými elektrárnami, je potřeba akumulovat energii v době přebytku, aby mohla být využita pro vyrovnání nebo překlenutí doby, kdy obnovitelné zdroje dodávku nezaručují. Dnes se tyto hodnoty pohybují na úrovni desítek až stovek kW po dobu několika hodin.

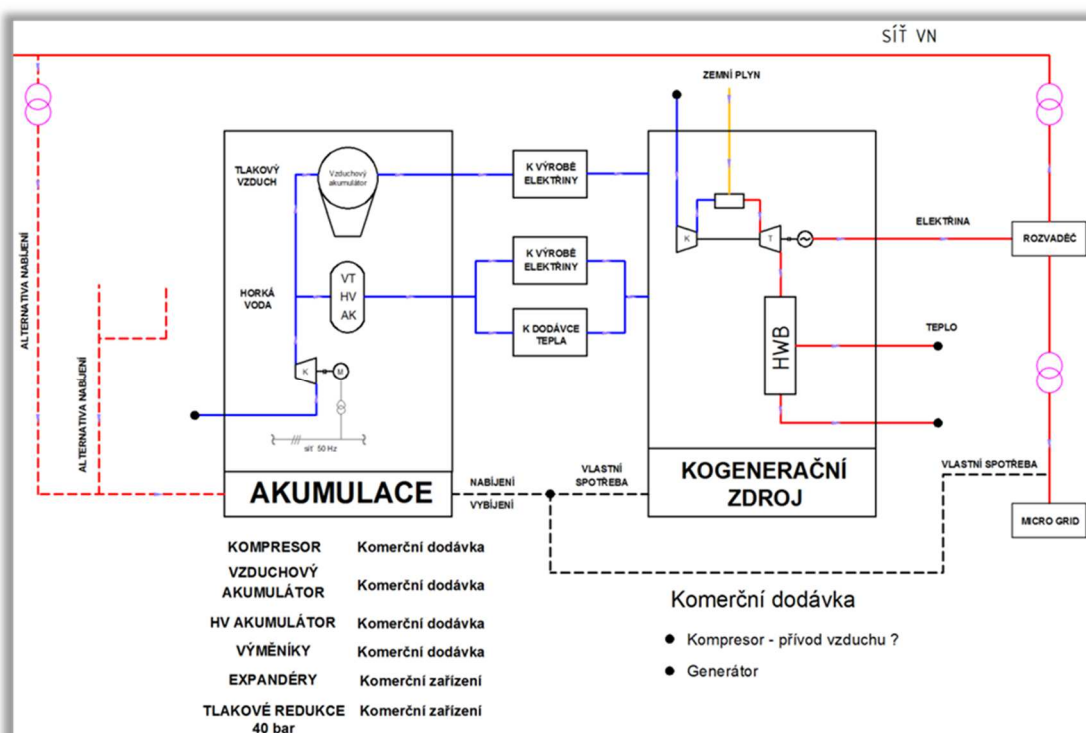
Koncepce decentralních zdrojů se týká vyrovnávání instalovaného výkonu v oblastech průmyslového ruchu a v oblastech s proměnlivou spotřebou energie, kde by spuštění nebo

vypnutí strojů s velkým příkonem mohlo rozhodit hodnoty sítě. Jedná se o výkony v desítkách MW po dobu desítek minut až několika hodin.

3.3.1 Systém CAES s akumulací tepla akumulčního kompresoru

Vyvíjená koncepce, která je zahrnuta v diplomové práci je využitelná především v případě decentrálních zdrojů, ale může fungovat i v režimu přenosové soustavy.

Obr. 3.5 Systém CAES s akumulací tepla kompresoru [24]



Vyvíjená koncepce je navržena jako jednotka, kterou je možno připojit ke klasickému energetickému zdroji. Což může být plynová turbína s horkovodním kotlem nebo parní kotel s parní turbínou s regulovaným odběrem jakožto kogenerační zdroje. To ale neznamená, že zdroj musí být vždy kogenerační, může se jednat i o klasický horkovodní kotel, důležité je splnit podmínku odběru tepla.

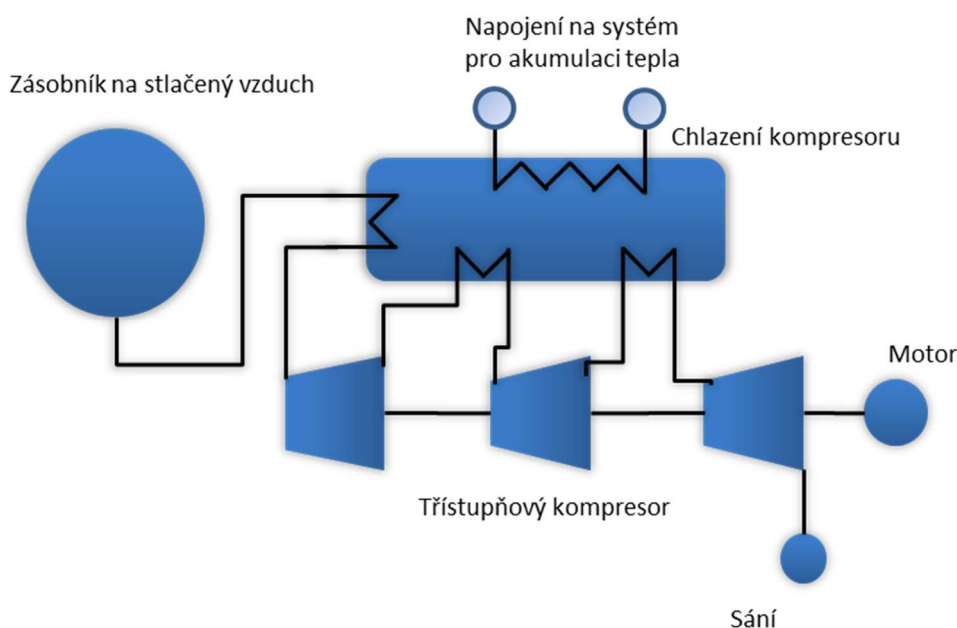
Během běžného provozu kogeneračního zdroje se nic nemění. Do spalovací turbíny je přiváděn zemní plyn spolu se stlačeným vzduchem, který je dodáván pomocí kompresoru nacházejícího se na stejné hřídeli jako turbína. Takto vzniklá směs je spalována a spaliny

jsou přiváděny na turbínu, kde částečně expandují a roztáčejí turbínu. Turbína následně roztáčí generátor, který z mechanické energie hřídele vytváří elektrickou energii. Spaliny, které opouštějí turbínu, mají ještě dostatek energie, a proto jsou přiváděny do horkovodního kotle, kde své teplo předají vodě. Ta je poté čerpána do horkovodní sítě pro dodávku tepla. Takto vyrobenou elektřinu dodáváme do vlastní decentrální sítě nebo rovnou do přenosové soustavy vysokého napětí.

Akumulační jednotka se v tomto režimu nevyužívá, ale může být použita pro akumulaci přebytků energie. Tyto přebytky se mohou objevovat v přenosové soustavě, v decentrální síti nebo také u obnovitelných zdrojů, jestliže se v okolí vyskytují.

Jak je popsáno výše, akumulaciční jednotka není během akumulace závislá na provozu kogenerační jednotky. Díky tomu je možné akumulovat energii i v případě odstavení kogeneračního zdroje. Akumulační jednotka se skládá ze standardního víceetapového kompresoru, díky němuž je dosaženo požadovaného tlaku. Kompresor je v mezichladičích chlazen vodou, aby bylo dosaženo co možná nejnižší teploty stlačeného vzduchu. Mezichladiče jsou umístěny mezi každým stupněm kompresoru. Teplá voda je poté odváděna z kompresoru a je shromažďována v tepelném zásobníku, odkud je využívána pro dodávku elektřiny. Tento odvod tepla a jeho využití ze zařízení má velký vliv na jeho celkovou účinnost.

Obr. 3.6 Schéma tříetapového akumulacičního kompresoru [vlastní zpracování]



Důležitou částí celého procesu akumulace je samotná dodávka vzduchu do zásobníku. Jelikož se jedná o uzavřenou nádobu s konstantním objemem, kterou střídavě plníme vzduchem, mění se zde tlakový poměr. Aby bylo dosaženo konstantní produkce kompresního tepla, je potřeba zajistit konstantní tlak vytvářený kompresorem. Tento problém je možno řešit několika způsoby. Mezi nejjednodušší patří využití škrtkých armatur. Jejich nevýhodou je vznik energetické ztráty, která se promítne na celkové účinnosti. Další možností je instalace redukčního zařízení, které redukcí tlaku energeticky využívá, takže má energetické ztráty výrazně nižší, ale jeho pořizovací cena je podstatně vyšší.

Hlavní podstatou akumulace energie je vrácení energie zpět do sítě s co možná nejvyšší účinností. Právě proto je nutné připojení akumulační jednotky k jednotce kogenerační. Tlakový vzduch je ze zásobníku dodáván do spalovací komory místo vzduchu, jež byl dodáván kompresorem kogenerační jednotky, který může být odpojen. Odpojení provádíme nejčastěji pomocí spojky na hřídeli s turbínou. Další možností, jak odpojit kompresor, je pomocí otevření výtlačných ventilů. Kompresor se sice bude stále točit, avšak v režimu naprázdno. Je tedy možné říct, že byla odpojena zátěž kompresoru.

Důležitou podmínkou dodávky stlačeného vzduchu ze zásobníku je zachování parametrů stlačeného vzduchu, jako by byl z kompresoru kogenerační jednotky. Stabilní průtok vzduchu o konstantním a správném tlaku může být zajištěn pomocí škrtkých armatur, redukčního zařízení nebo také částečnou expanzí na turbíně. Při navrhování akumulační nádoby je uvažováno, že vzduch uložený v zásobníku bude mít větší tlak než ten, se kterým pracuje kogenerační jednotka. Důvodem je to, že skladujeme vzduch o vyšším tlaku, aby se ho do akumulační nádrže vlezlo co nejvíce. Druhým důvodem je, že tlak v akumulační nádrži nemůže klesnout pod mez tlaku, pro který je navržena spalovací komora. Jakmile by se hodnota v akumulátoru dostala pod hodnotu tohoto tlaku, je považován za vybitý.

Jelikož je mechanismus elektrárny nastaven na hodnoty vzduchu z kompresoru, je vhodné snažit se tyto parametry zachovat. Ovšem je zde možná určitá výchylka, při které by mechanismus kogenerační jednotky stále bezproblémově fungoval.

Tlak a průtok vzduchu lze nastavit pomocí ventilů při odběru ze zásobníku, avšak teplotu takto regulovat nelze. Jedním z jednodušších řešení je zvyšování spotřeby zemního

plynu, čímž je teplota spalin dorovnávána. Takovýto chod je dlouhodobě možný, ale jedná se o řešení, které je z pohledu energetické bilance nevhodné. Efektivnější způsob spočívá ve využití akumulovaného tepla, které lze použít pro předehřev vzduchu. Pro ohřev vzduchu na konečnou teplotu se dá využít teplo odpadních spalin za plynovou turbínou. Chybějící teplo v horké vodě z horkovodního kotle za plynovou turbínou se dodá opět z kompresního tepla akumulovaného v horké vodě v akumulátoru.

Pokud se hodnoty teploty vzduchu dostanou na vyšší než požadované hodnoty je pro spalování potřeba méně plynu a přitom je dosaženo efektivního provozu. Z toho vyplývá, že pokud je pomocí odpadního tepla dosaženo zvýšení teploty akumulovaného vzduchu na původní hodnoty kompresoru nebo případně vyšší, mírně by se zvýšila celková účinnost akumulace. Zvyšování účinnosti tímto způsobem je omezeno návrhem původního kogeneračního zdroje.

4 Tepelná bilance horkovodního akumulátoru

Ke zpracování této kapitoly byly využity tyto zdroje [7, 8, 24]

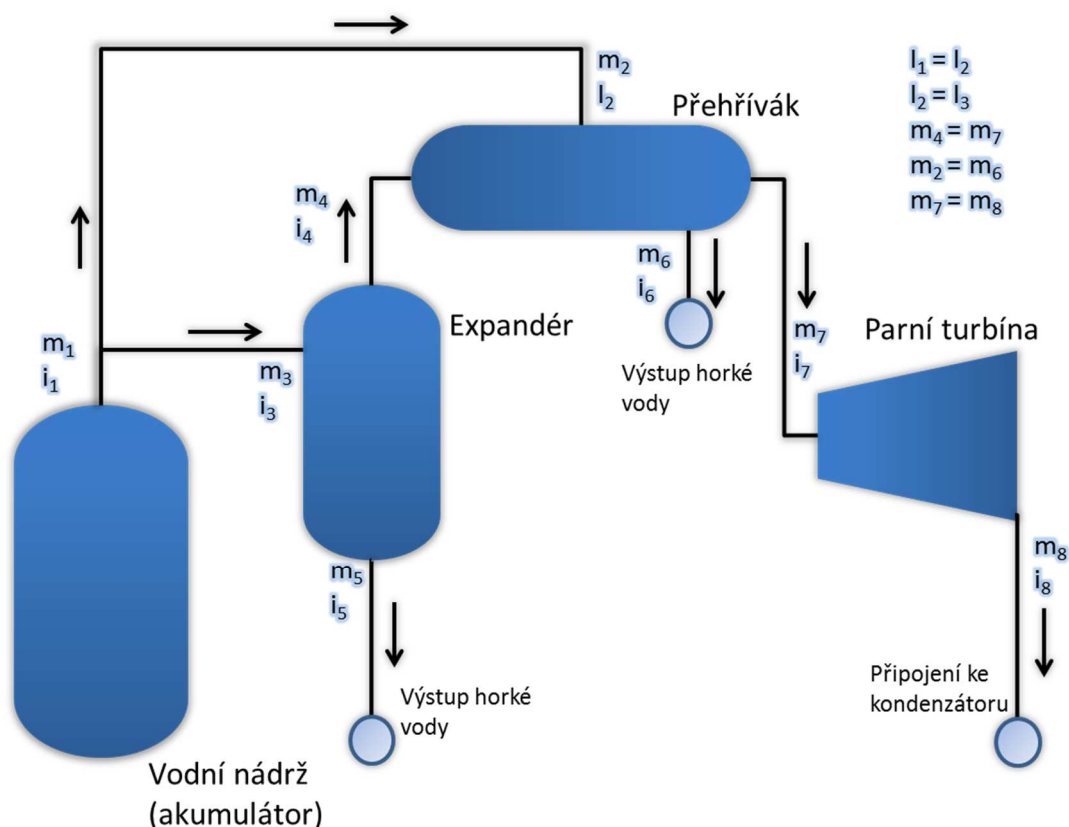
Tato kapitola se zabývá popisem horkovodního akumulátoru a systému pro využití naakumulované tepelné energie v zásobníku. Jak již bylo zmíněno, během akumulace energie do tlakového vzduchu vzniká velké množství tepla na akumulačním kompresoru. Ten se musí pro optimální provozní podmínky chladit v každém stupni. Normálně by tato energie byla nevyužita, případně částečně posílána do horkovodní sítě. Avšak v navrhovaném systému bude energie v podobě horké tlakové vody posílána a akumulována v horkovodním akumulátoru, odkud může být dále využita pro dodávku elektrické energie.

4.1 Zjednodušené schéma systému s horkovodním akumulátorem pro výpočet základních hodnot

Systém je složen z několika základních částí. Hlavní část je tvořena horkovodním akumulátorem (vodní nádrž), který akumuluje teplo odváděné od akumulačního kompresoru. Vodní nádrž je dále připojena k expandéru, přehříváku a následně k parní turbíně viz obr. 4.1.

Horká voda je v prvním kroku přiváděna do expandéru, kde částečně expanduje. Touto expanzí se část tlakové vody změní v páru. V expandéru nastává subkritická oblast, kde vzniká určité množství tlakové vody a mokré páry. Tlaková voda je poté využívána v horkovodní síti a vytvořená mokrá pára je dále přiváděna do přehříváku, který je napájen horkou vodou přiváděnou přímo z horkovodního akumulátoru. Tímto jsou zvýšeny parametry mokré páry, čímž se z ní stává pára přehřátá. A ta jde dále na parní turbínu, kde expanduje a roztáčí turbínu. Moment vzniklý na turbíně je po hřídeli přenášén na generátor, čímž zajišťuje dodávku elektriny.

Obr. 4.1 Schéma systému pro akumulaci a následné využití horké vody [vlastní zpracování]



4.2 Výpočty základních hodnot

Pro výpočty jsou využívány hodnoty vypsane v úvodu této diplomové práce.

Pro výpočet hmotnostních průtoků je nutné znát nejen zadané hodnoty, ale také hodnoty entalpie vody a vodní páry v celém oběhu. Tyto entalpie jsou zjištěny z tabulek pomocí zadaných tlaků a teplot. Při všech výpočtech je předpoklad neměnného množství vody v akumulátoru.

Tab. 4.1 Hodnoty entalpií

Část systému	Teplota [°C]	Tlak [bar]	Entalpie [kJ/kg]
Vodní nádrž i_1 (voda)	240,00	40,00	1 037,58
Expandér i_5 (voda)	158,83	6,00	670,36
Expandér i_4 (mokrý pára)	158,83	6,00	2 756,14
Turbína i_7 (přehřátá pára)	210,00	5,99	2 872,51

Za pomoci bilance entalpií v expandéru byla vytvořena následující rovnice. Entalpie vstupující vody i_1 se musí rovnat součtu entalpií vycházejících. Tedy součtu entalpie v mokré páře i_4 a entalpie v tlakové vodě i_5 . Jelikož je hmotnostní průtok neznámý, je do rovnice doplněn poměrový index x . Veškeré označení se řídí dle obr. 4.1.

(4.1)

$$i_1 = i_4 * x + (1 - x) * i_5$$

Kde: i_1 entalpie na výstupu z horkovodního zásobníku,
 i_4 entalpie mokré páry na výstupu z expandéru,
 i_5 entalpie tlakové vody na výstupu z expandéru,
 x koeficient suchosti páry.

Z rovnice je vyjádřeno x , které je potřebné pro dopočítání hmotnostního průtoku tlakové vody a mokré páry vycházející z expandéru.

(4.2)

$$x = \frac{i_1 - i_5}{i_4 - i_5}$$

$$x = \frac{1\,037,58 - 670,49}{2\,756,14 - 670,49}$$

$$x = 0,1760$$

Za předpokladu, že množství vody v zásobníku je konstantní platí:

(4.3)

$$m_1 = m_2 + m_3$$

(4.4)

$$m_3 = m_4 + m_5$$

Kde: m_1 hmotnostní průtok na výstupu z horkovodního akumulátoru,
 m_2 hmotnostní průtok na vstupu do přehříváku,
 m_3 hmotnostní průtok na vstupu do expandéru,
 m_4 hmotnostní průtok mokré páry na výstupu z expandéru,
 m_5 hmotnostní průtok tlakové vody na výstupu z expandéru.

Pro vyjádření hmotnostního toku v expandéru platí rovnice:

(4.5)

$$m_4 = m_3 * x$$

(4.6)

$$m_5 = m_3 * (1 - x)$$

Kde: m_3 hmotnostní průtok na vstupu do expandéru,
 m_4 hmotnostní průtok mokré páry na výstupu z expandéru,
 m_5 hmotnostní průtok tlakové vody na výstupu z expandéru,
 x koeficient suchosti páry.

Poslední rovnici, kterou je zapotřebí, je balance přehříváku, tedy že součet vstupů se musí rovnat součtu výstupu.

(4.7)

$$m_4 * i_4 + m_2 * i_2 = m_7 * i_7 + m_6 * i_6 + Q_z$$

Kde: i_2 entalpie na vstupu do přehříváku,
 i_4 entalpie mokré páry na výstupu z expandéru,
 i_6 entalpie na výstupu z přehříváku,
 i_7 entalpie na vstupu do turbíny,
 m_2 hmotnostní průtok na vstupu do přehříváku,
 m_4 hmotnostní průtok mokré páry na výstupu z expandéru,
 m_6 hmotnostní průtok na výstupu z přehříváku,
 m_7 hmotnostní průtok na vstupu do turbíny,
 Q_z ztráty.

Díky tomu, že se některé neznámé rovnají (viz Obr. 4.1), např. $m_2 = m_6$, je možné vzorec zjednodušit. Ve výpočtu je počítáno s nulovými ztrátami.

(4.8)

$$m_4 * i_4 + m_2 * i_2 = m_4 * i_7 + m_2 * i_6$$

$$m_4 * (i_4 - i_7) = m_2 * (i_6 - i_2)$$

Za pomoci rovnic 4.3, 4.5 a 4.8 dostáváme tři rovnice o třech neznámých m_2 , m_3 , m_4 . Sloučením rovnic dostaneme rovnici pro výpočet m_3 .

(4.9)

$$m_3 = \frac{m_1 * (i_6 - i_2)}{x * (i_4 - i_7) - (i_2 - i_6)}$$

$$m_3 = \frac{24\,983 * (715,74 - 1\,037,58)}{0,1760 * (2\,756,14 - 2\,872,51) - (1\,037,58 - 715,74)}$$

$$m_3 = 23\,488 \text{ kg/h}$$

Dosazením výsledného m_3 do předchozích základních rovnic jsou vypočítány hodnoty dalších hmotnostních průtoků.

$$m_2 = m_6 = 1\,495 \text{ kg/h}$$

$$m_4 = m_7 = 4\,134 \text{ kg/h}$$

$$m_5 = 19\,354 \text{ kg/h}$$

4.3 Analýza vlivu změny parametrů horké vody v akumulátoru na průtoky v celém systému.

V následujících tabulkách je znázorněna závislost jednotlivých vypočtených hodnot hmotnostních průtoků na změně teploty, tlaku, případně obojího ve vodní nádrži. V závislosti na těchto změnách se bude měnit entalpie tlakové vody i_1 v horkovodním akumulátoru. Hodnoty teplot a tlaků v ostatních zařízeních zůstávají stejné, tedy i jejich entalpie, což je dáno dimenzováním zařízení na určité hodnoty média.

Důsledkem neměnnosti ostatních entalpií je změna všech hmotnostních průtoků v systému, ať už se jedná o množství teplé tlakové vody přicházející do expandéru m_3 , nebo o změnu hmotnostního toku výstupní vody z expandéru m_5 a přehříváku m_2 . Avšak nejdůležitějším měnícím se parametrem je hmotnostní tok výstupní přehřáté páry m_7 , která udává velikost elektrického výkonu.

Následující výpočty jsou provedeny na základě vzorců 4.1 – 4.9.

Změna teploty při zachování stávajícího tlaku

Při stávajícím tlaku 40 bar měníme teplotu z 240 na 245 a 250.

Tab. 4.2 Hodnota entalpie pro teplotu 245 °C

Část systému	Teplota [°C]	Tlak [bar]	Entalpie [kJ/kg]
Vodní nádrž (voda)	245	40	1 061,50

Tab. 4.3 Hodnoty hmotnostního průtoku dle tab. 4.2

Hm. průtoky	Hodnoty [kg/h]
$m_2 = m_6$	1 483
m_3	23 500
$m_4 = m_7$	4 406
m_5	19 094

Tab. 4.4 Hodnota entalpie pro teplotu 250 °C

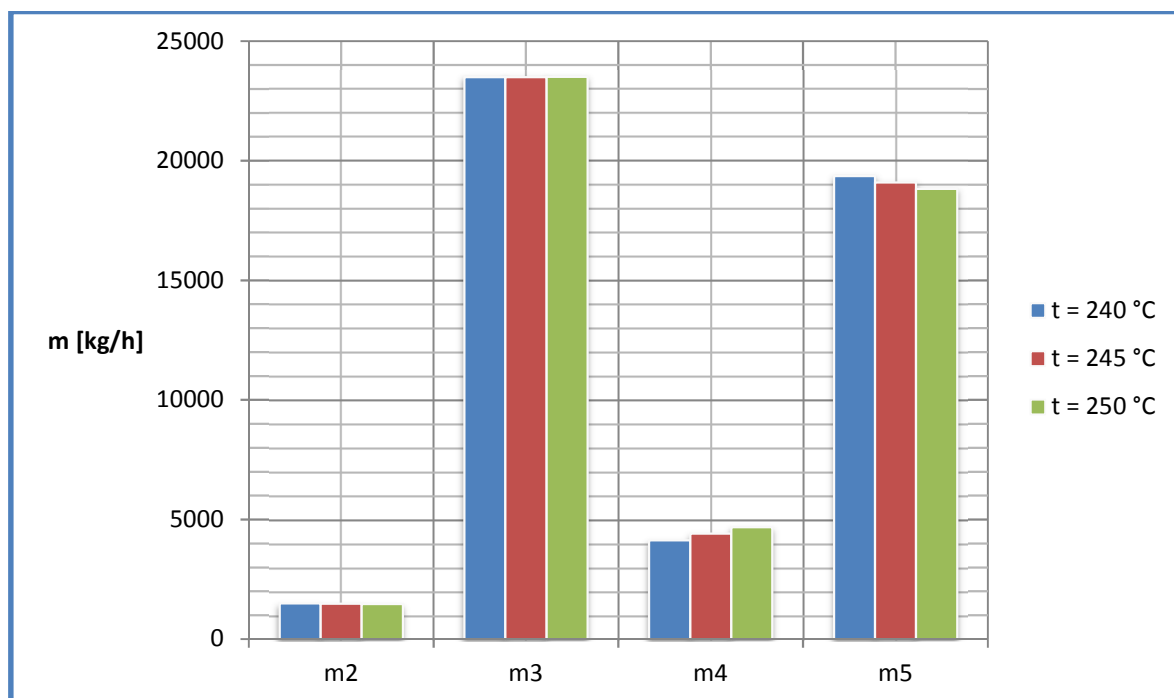
Část systému	Teplota [°C]	Tlak [bar]	Entalpie [kJ/kg]
Vodní nádrž (voda)	250	40	1 085,69

Tab. 4.5 Hodnoty hmotnostního průtoku dle tab. 4.4

Hm. průtoky	Hodnoty [kg/h]
$m_2 = m_6$	1 472
m_3	23 511
$m_4 = m_7$	4 680
m_5	18 830

Z předchozích hodnot měnicího se hmotnostního průtoku v závislosti na změně teploty v horkovodním akumulátoru je vykreslen graf 4.1.

Graf 4.1 Změna hmotnostního průtoku v závislosti na teplotě v horkovodním akumulátoru



Z grafu lze vyčíst, že hodnoty hmotnostního průtoku vody přiváděné do přehříváku m_2 a vody přiváděné do expandéru m_3 se nijak razantně nemění. Nicméně zvyšující se hodnoty hmotnostního průtoku mokré páry m_4 a snižující se hodnoty hmotnostního průtoku tlakové vody m_5 za zmínku stojí. Během expanze v expandéru je dosaženo vyššího množství mokré páry, pro jejíž přehřátí v přehříváku postačí menší množství napájecí vody, jelikož má vyšší teplotu. Takovéto množství přehřáté páry zajistí větší výkon turbíny a následně i generátoru.

Hodnota hmotnostního toku mokré páry m_4 se v závislosti na změnu teploty o 5 °C zvýší o 6,58% a když se teplota zvýší o dalších 5 °C na teplotu 250 °C, zvýší se hodnota m_4 o 13,21% oproti původní hodnotě při 240°C.

Změna teploty i tlaku

V tomto případě je měněna teplota na základě změny tlaku tak, aby byl v akumulátoru dosažen stav sytosti, tedy srovnatelný stav s předchozí analýzou 40 bar a 250°C. Tlak měníme ze 40 bar na 45 bar a na 50 bar.

Tab. 4.6 Hodnoty entalpií pro tlak 40 baru při teplotě sytosti 250 °C

Část systému	Teplota [°C]	Tlak [bar]	Entalpie [kJ/kg]
Vodní nádrž (voda)	250	40	1 085,69

Tab. 4.7 Hodnoty hmotnostního průtoku dle tab. 4.6

Hm. průtoky	Hodnoty [kg/h]
m₂ = m₆	1 472
m₃	23 511
m₄ = m₇	4 680
m₅	18 830

Tab. 4.8 Hodnoty entalpií pro tlak 45 bar při teplotě sytosti 257,44 °C

Část systému	Teplota [°C]	Tlak [bar]	Entalpie [kJ/kg]
Vodní nádrž (voda)	257,44	45	1 122,14

Tab. 4.9 Hodnoty hmotnostního průtoku dle tab. 4.8

Hm. průtoky	Hodnoty [kg/h]
m₂ = m₆	1 459
m₃	23 524
m₄ = m₇	5 094
m₅	18 430

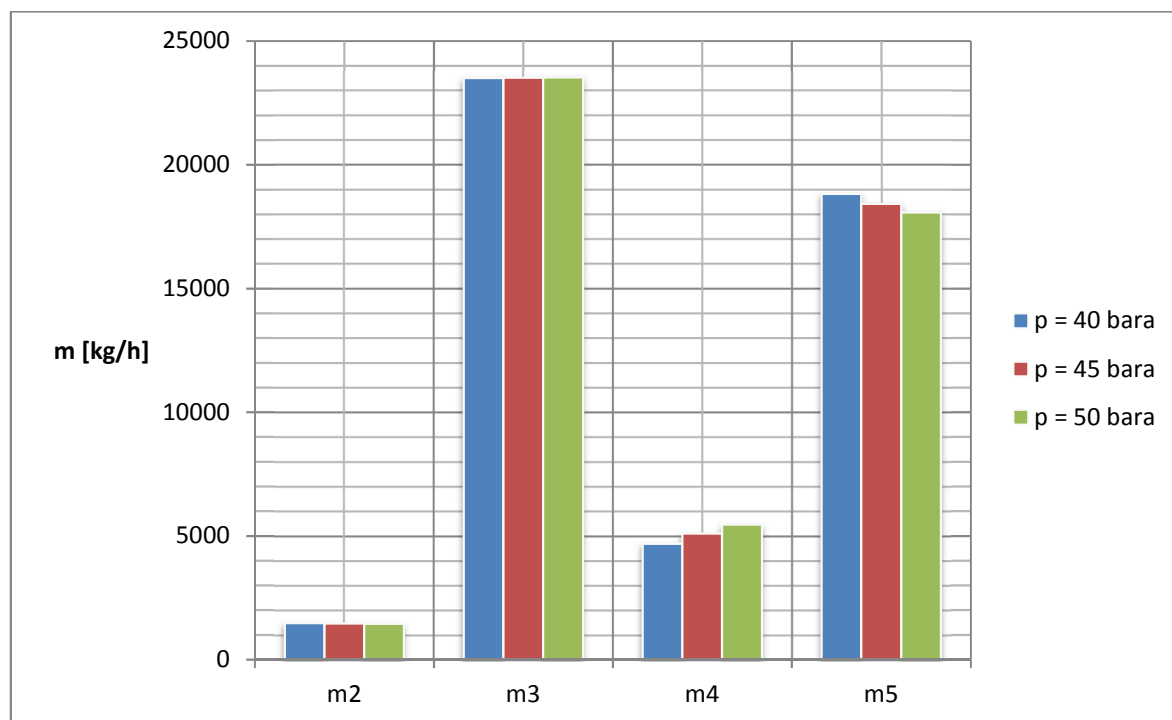
Tab. 4.10 Hodnoty entalpií pro tlak 50 bar při teplotě sytosti 263,94 °C

Část systému	Teplota [°C]	Tlak [bar]	Entalpie [kJ/kg]
Vodní nádrž (voda)	263,94	50	1 154,50

Tab. 4.11 Hodnoty hmotnostního průtoku dle tab. 4.10

Hm. průtoky	Hodnoty [kg/h]
$m_2 = m_6$	1 449
m_3	23 534
$m_4 = m_7$	5 462
m_5	18 073

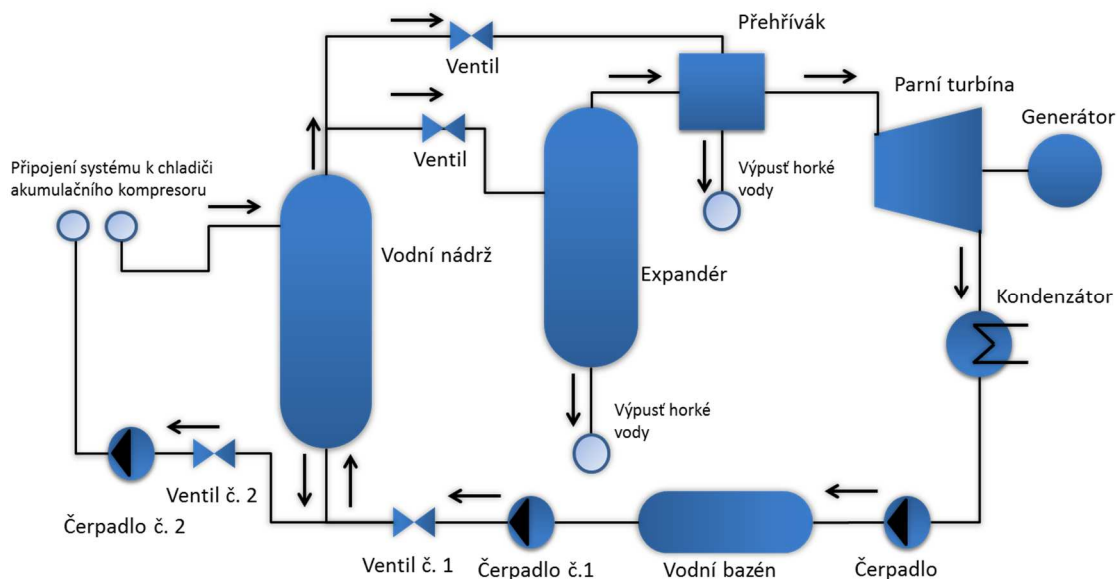
Z hodnot měnicího se hmotnostního průtoku závislého na změně tlaku a teploty sytosti v horkovodním akumulátoru je vykreslen graf 4.2.

Graf 4.2 Změna hmotnostního průtoku v závislosti na tlaku v horkovodním akumulátoru při úpravě teploty na mez sytosti

Graf 4.2 je na první pohled velmi podobný grafu 4.1. Nicméně u hmotnostních průtoků m_4 a m_5 lze vidět větší skoky. Tyto výraznější skoky jsou způsobeny udržováním hodnot v oblasti sytosti, kde se na základě zvyšujícího se tlaku zvyšuje i teplota.

4.4 Skutečné schéma systému s horkovodním akumulátorem

Obr. 4.2 Skutečné schéma systému s horkovodním akumulátorem [vlastní zpracování] (viz Příloha č. 1)



Obr. 4.1 znázorňoval pouze hlavní komponenty systému akumulace v horkovodním zásobníku, které jsou potřebné pro výpočty hmotnostních toků, zatímco obr. 4.2 znázorňuje kompletní provozuschopné schéma.

První důležitou částí horkovodního akumulátoru je nabíjení. Proces akumulace začíná naještěm ze studeného stavu, kdy se otevře ventil č. 1 a spustí se čerpadlo č. 1. Tímto je čerpána chladicí voda z vodního bazénu do akumulační nádrže. Jakmile je nádrž zcela napuštěná, je čerpadlo č. 1 vypnuto a ventil č. 1 uzavřen. Následně otevřením ventilu č. 2 a spuštěním čerpadla č. 2 začne proudit voda skrz chladič akumulačního kompresoru, kde se voda ohřeje na příslušnou teplotu a proudí dále až do horkovodní akumulační nádrže. Takto voda proudí, dokud není akumulátor nabitý.

Po úplném nabití akumulátoru začíná proces vybíjení. V této části procesu se vypne čerpadlo č. 2 a uzavře ventil č. 2. Následně je otevřen ventil č. 1 a čerpadlo č. 1 začne čerpat vodu z vodního bazénu do horkovodního akumulátoru. Tímto je horká tlaková voda vytlačována dále do systému a akumulátor se plní studenou vodou, která je připravená pro další chlazení kompresoru.

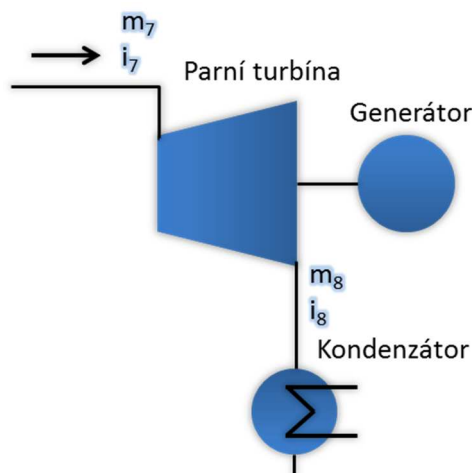
Horká tlaková voda proudí do expandéru, kde částečně expanduje. Část vody zůstane ve stejném skupenství, ale o nižší teplotě a tlaku a část tlakové vody se změní v mokrou páru také o nižší teplotě a tlaku. Tato pára je poté v přehříváku přehřáta na vyšší teplotu. Takto přehřátá pára roztáčí turbínu, která pohání generátor. Vyexpandovaná pára zkondenzuje na kondenzátoru, odkud je čerpána zpět do vodního bazénu. Teplo uvolněné během kondenzace je možno použít pro horkovodní síť.

5 Elektrický výkon horkovodního akumulátoru

Ke zpracování této kapitoly byly využity tyto zdroje [7, 22]

V této kapitole je počítán celkový elektrický výkon horkovodního akumulátoru, který vzniká na svorkách elektrického generátoru.

Obr. 5.1 Schéma turbíny a generátoru [vlastní zpracování]



5.1 Výpočet elektrického výkonu generátoru

Výpočet elektrického výkonu je proveden na základě rozdílnosti vstupních a výstupních hodnot parní turbíny. V první řadě je zapotřebí zjistit, jaká je výsledná entalpie na výstupu z turbíny, pokud se koeficient sytosti páry rovná 0,8944. Po dopočtení této entalpie lze vypočítat entalpický spád mezi vstupem a výstupem turbíny. Poté lze vypočíst elektrický výkon. Dále je možné vypočítat množství elektrické energie vyrobené za jednu hodinu, jež se rovná kapacitě horkovodního akumulátoru. Z průměrné ceny a množství vyrobené energie lze vypočítat peněžní hodnotu akumulované energie.

Tab. 5. 1 Parametry na vstupu

Část systému	Teplota [°C]	Tlak [bar]	Entalpie [kJ/kg]
Turbína	210,00	5,99	2 872,51

Tab. 5. 2 Parametry na výstupu

Část systému	Teplota [°C]	Tlak [bar]	Entalpie [kJ/kg]
Za turbínou i'₈ (voda)	39	0,07	163,36
Za turbínou i''₈ (mokrý pára)	39	0,07	2 571,76

Výpočet výsledné entalpie za turbínou

(5.1)

$$i_8 = x * i''_8 + (1 - x) * i'_8$$

$$i_8 = 0,8944 * 2\,571,76 + (1 - 0,8944) * 163,36$$

$$i_8 = 2\,282,93 \text{ kJ/kg}$$

Kde: i_8 entalpie na výstupu z turbíny,

i'_8 entalpie tlakové vody na výstupu z turbíny,

i''_8 entalpie mokré páry na výstupu z turbíny,

x koeficient suchosti páry.

Výpočet entalpického spádu

(5.2)

$$\Delta H_{ad} = i_7 - i_8$$

$$\Delta H_{ad} = 2\,872,51 - 2\,282,93$$

$$\Delta H_{ad} = 589,58 \text{ kJ/kg}$$

Kde: ΔH_{ad} adiabatický entalpický spád,

i_7 entalpie na vstupu do turbíny,

i_8 entalpie na výstupu z turbíny.

Elektrický výkon na svorkách generátoru

$$\text{Účinnost termodynamická svorková } \eta_{tdsv} = 0,76 \quad (5.3)$$

$$P_{sv} = m_7 * \Delta H_{ad} * \eta_{tdsv}$$

$$P_{sv} = 1,148 * 589,58 * 0,76$$

$$P_{sv} = 514,55 \text{ kW}$$

Kde: ΔH_{ad} adiabatický entalpický spád,
 m_7 hmotnostní tok na vstupu do turbíny,
 η_{tdsv} termodynamická účinnost svorková,
 P_{sv} elektrický výkon na svorkách generátoru.

Množství energie vyprodukované horkovodním akumulčním systémem za 1 hodinu

(5.4)

$$P_{mve} = P_{sv} * t$$

$$P_{mve} = 514,55 * 1$$

$$P_{mve} = 514,55 \text{ kWh}$$

Kde: P_{mve} množství vyprodukované elektrické energie,
 P_{sv} elektrický výkon na svorkách generátoru,
 t čas.

Přibližná cena akumulované energie

(5.5)

$$C_{ae} = P_{mve} * C_e$$

$$C_{ae} = 514,55 * 4,5$$

$$C_{ae} = 2\,316 \text{ Kč}$$

Kde: C_{ae} celková cena akumulované energie,
 C_e průměrná cena elektrické energie za 1 kWh,
 P_{mve} množství vyprodukované elektrické energie.

5.2 Analýza vlivu změny parametrů horké vody v akumulátoru na výrobu elektřiny

Následující tabulka je sestavena na základě výpočtů dle vzorce 5.3, přičemž byla zvyšována teplota v horkovodním akumulátoru. Toto zvýšení nemělo vliv na entalpický spád, ale pouze na hmotnostní průtok, který má vliv na velikost výkonu.

Tab. 5.3 Hodnoty výkonu v závislosti na změně teplotě v horkovodním akumulátoru

Teplota [°C]	Tlak [bar]	Výkon [kW]
240	40	514,55
245	40	548,40
250	40	582,51

Z tab. 5.3 lze vypočítat zvyšující se výkon v závislosti na zvyšující se teplotě v horkovodním akumulátoru při zachování stávajícího tlaku. Zvyšující se teplota o 5 °C má vliv na zvyšující se hmotnostní průtok, který zvyšuje celkový výkon na svorkách generátoru o 6,58%. Další zvýšení teploty na 250 °C v konečném důsledku zvýšilo výkon generátoru o dalších 6,63 % na 582,51 kW oproti původní hodnotě výkonu při teplotě 240 °C.

Tab. 5.4 Hodnoty výkonu v závislosti na změně tlaku v horkovodním akumulátoru při úpravě teploty na mez sytosti

Tlak [bar]	Teplota [°C]	Výkon [kW]
40	250,00	582,51
45	257,44	634,03
50	263,94	679,84

Tab. 5.4 ukazuje změnu výkonu v závislosti na změně tlaku v horkovodním akumulátoru při teplotě upravené na mez sytosti. Oproti tab. 5.1 lze vidět, že výkon roste rychleji, což je dáno úpravou hodnot teploty, která je udržována v mezi sytosti, na základě zvyšujícího se tlaku. Při zvýšení tlaku z původních 40 bar na 45 bar se výkon zvýší o 8,84 % a při dalším zvýšení tlaku o 5 bar se výkon zvýší o dalších 7,87 %.

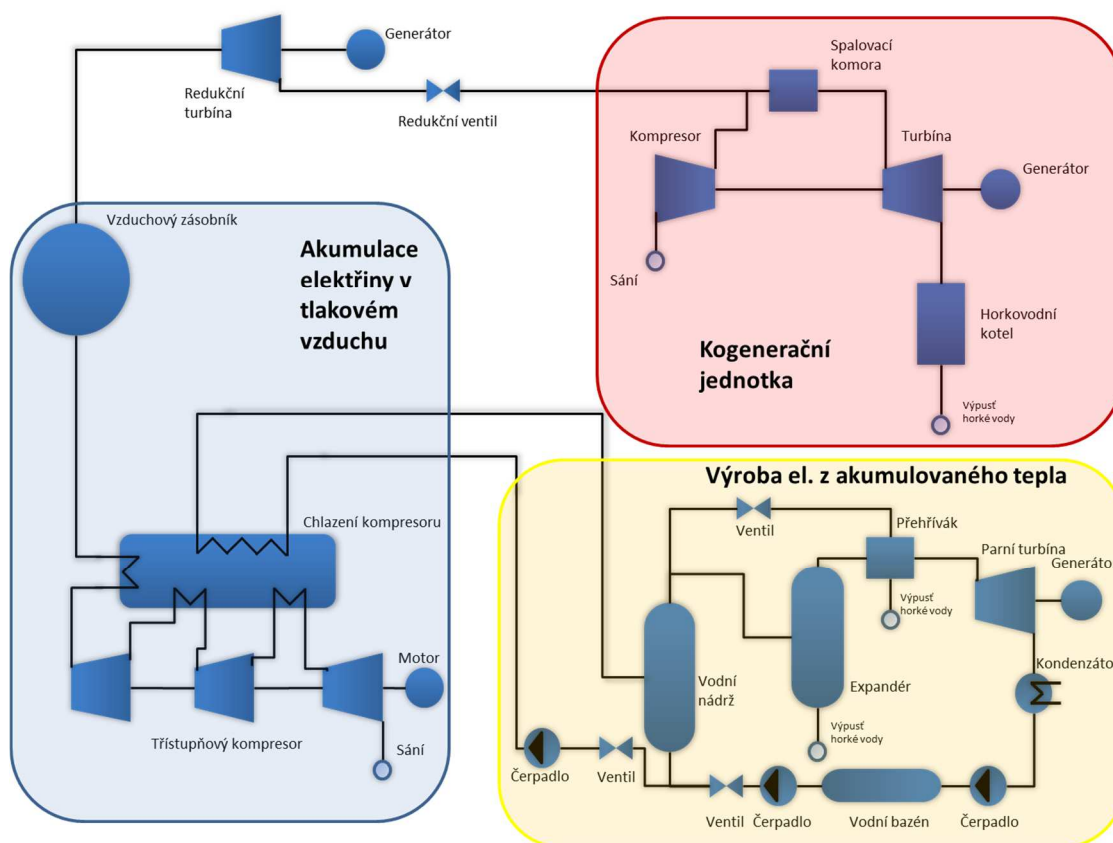
6 Tepelné schéma akumulace s horkovodním akumulátorem EC - CAES

Ke zpracování této kapitoly byly využity tyto zdroje [8, 9, 24]

V této kapitole bude představen celý systém kogenerační elektrárny s přídatným systémem akumulace elektrické energie v tlakovém vzduchu CAES, který je dále rozšířen o horkovodní systém pro zachytávání odpadního tepla z akumulárního kompresoru a následnou distribuci elektrické energie v době přebytků.

6.1 Základní rozdělení schématu

Obr. 6.1 Změna výkonu v závislosti na teplotě v horkovodním akumulátoru [vlastní zpracování]



Celé schéma můžeme rozdělit do tří skupin (viz schéma):

- a) kogenerační jednotka,
- b) akumulární část systému CAES,
- c) akumulární část systému horkovodního akumulátoru.

Pracovní režimy rozebíraného systému kogenerační jednotky spolu se systémem CAES a akumulací tepla horkovodním akumulátorem:

- a) kogenerační jednotka,
- b) akumulární jednotka CAES současně se systémem horkovodní akumulace (nabíjení),
- c) kogeneračního zdroj včetně akumulární jednotky CAES současně se systémem horkovodní akumulace (nabíjení),
- d) systém horkovodní akumulace (vybíjení),
- e) kogenerační zdroj s dodávkou akumulovaného stlačeného vzduchu (vybíjení),
- f) kogenerační zdroj s dodávkou akumulovaného stlačeného vzduchu včetně systému horkovodní akumulace (vybíjení).

Kogenerační jednotka je základním kamenem navrhovaného systému, jelikož je potřeba pro stálou dodávku elektrické a tepelné energie. Většinou se jedná o kogenerační jednotku, která je již v provozu jako zdroj jmenovitého výkonu v síti. Takováto samostatná část nemá žádnou schopnost akumulace, ale jelikož se jedná o kogenerační zdroj se spalovací turbínou, je řazena mezi systémy, které pohotově vyrovnávají nedostatky v síti, avšak pouze za předpokladu, že právě nepracuje jako zdroj jmenovitého výkonu v síti.

V případě že je potřeba zvýšit výkon zdroje pro vyrovnávání sítě v době nedostatku, anebo v případě uchovávání energie v době přebytku energie v síti, je využíván rozšířitelný systém CAES. Připojení systému CAES s vlastním akumulárním kompresorem ke kogeneračnímu zdroji je velmi jednoduché. Pro propojení je využíváno přívodní potrubí akumulace, které je napojeno na přívodní potrubí vedoucí ke spalovací komoře. Přepínání mezi jednotlivými režimy přívodu stlačeného vzduchu je řízeno několika regulačními armaturami.

Velmi důležitým faktorem, který je potřeba zachovat je teplota a tlak stlačeného vzduchu proudícího z kompresoru kogenerační jednotky. Způsob zajištění těchto hodnot viz kapitola 3.3.1. Systém CAES s vlastním akumulárním kompresorem má obrovskou

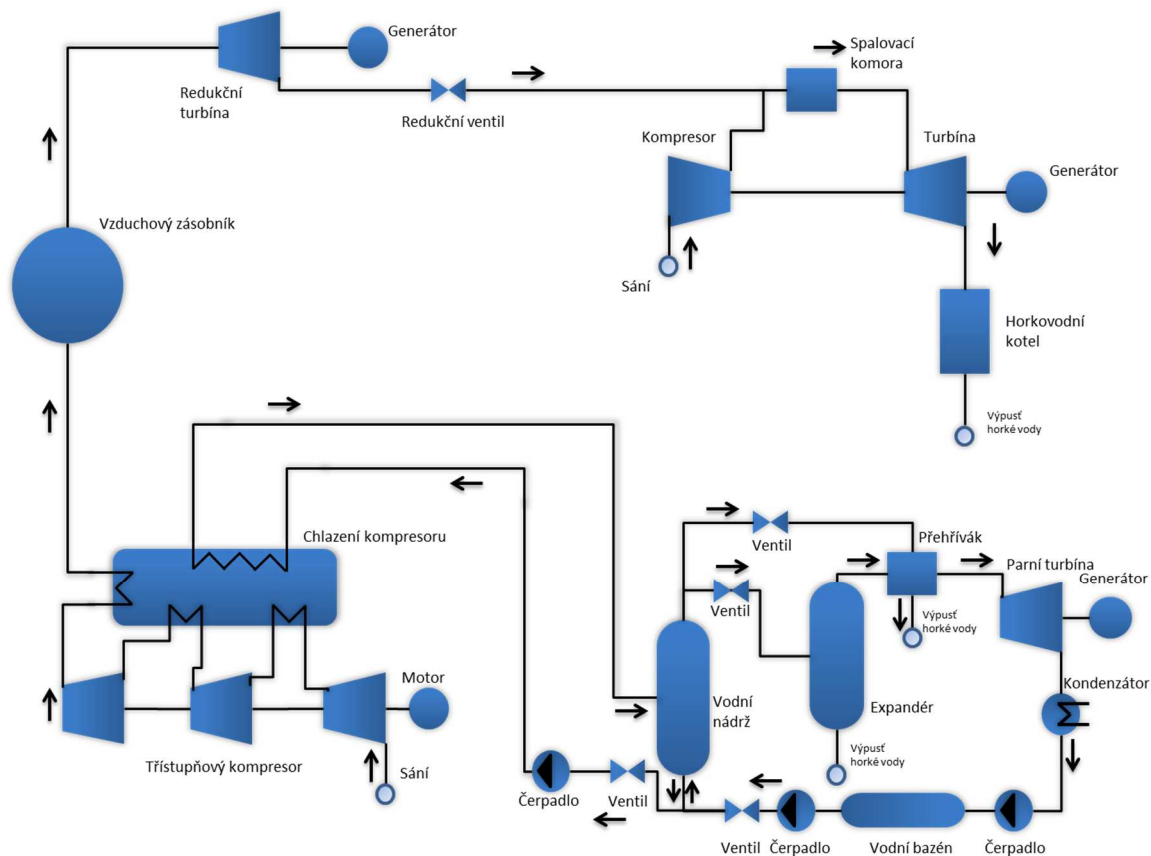
výhodu při nabíjení, které může probíhat nezávisle na kogenerační jednotce. Díky tomu je kogenerační jednotka schopna dodávat stálý výkon do energetické sítě a zároveň akumulovat energii např. z blízkých obnovitelných zdrojů.

Během vybíjení je využíván naakumulovaný stlačený vzduch, který je přiváděn do spalovací komory. Díky tomu je možno odpojit kompresor kogenerační jednotky, čímž je na hřídeli dosaženo mnohem většího kroutícího momentu. To se promítne na generátoru, který je v okamžiku schopen dodávat více než dvojnásobný výkon. Tento způsob akumulace je velmi vynalézavý, nicméně nedokáže konkurovat přečerpávacím elektrárnám, co se týče účinnosti. Velké množství energie je ztraceno kvůli zahřívání akumulačního kompresoru. Zde vznikla myšlenka akumulace tepla do horkovodního systému za účelem pozdějšího využití pro dodávku elektrické energie.

Systém pro akumulaci tepla je připojen k chladiči akumulačního kompresoru. Přičemž je důležité dimenzování systému akumulace do horkovodního akumulátoru podle akumulace CAES. Je potřeba, aby byly oba systémy nabity ve stejnou chvíli, aby nedocházelo jen k částečnému nabití jedné části, nebo naopak k přehřívání části druhé. Pokud je toto zajištěno, lze zvýšit účinnost celého systému až o desítky procent.

6.2 Popis funkce celého zařízení

Obr. 6.2 Změna výkonu v závislosti na teplotě v horkovodním akumulátoru [vlastní zpracování] (viz Příloha č. 2)



Během normálního stavu sítě, tedy není přebytek ani nedostatek elektrické energie v síti, pracuje pouze kogenerační zdroj pro jmenovitou dodávku výkonu do sítě. Ostatní jednotky nepracují. Avšak pokud v síti nastane přebytek energie, jsou do systému zapojeny zbývající jednotky.

Je spuštěn akumulační kompresor, který akumuluje vzduch do vzduchového zásobníku. Spolu s akumulačním kompresorem je spuštěno také čerpadlo, které žene studenou vodu skrz chladič kompresoru. Takto ohřátá voda je následně akumulována v horkovodním akumulátoru. Tato část procesu se týká nabíjení, během kterého je na sobě závislá jednotka CAES s jednotkou pro akumulaci horké tlakové vody. Kogenerační jednotka může být v tomto režimu v provozu nebo může být vypnuta.

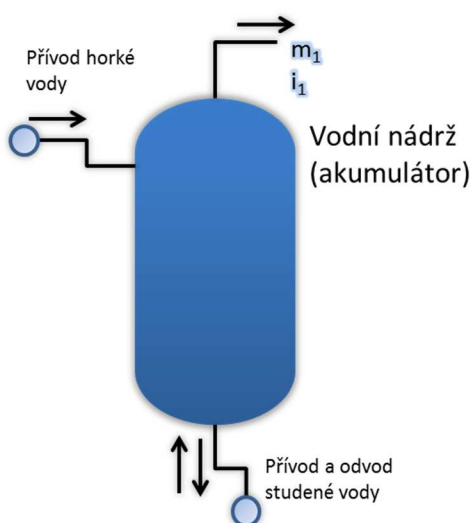
Pokud však nastane v síti nedostatek energie spouští se proces vybíjení. Do kogenerační jednotky je vháněn stlačený vzduch ze zásobníku, díky němuž je možné odpojit kompresor kogenerační jednotky. Během tohoto vybíjení naakumulovaného vzduchu může pracovat i systém horkovodního zásobníku, který však dokáže pracovat i samostatně. V horkovodním zásobníku vzniká pomocí expanze mokrá pára, která je dále přehřáta v přehříváku. Tato pára následně roztáčí turbínu, čímž je zajištěn další výkon pro vyrovnávání nedostatků v síti.

7 Návrh horkovodního akumulátoru

Ke zpracování této kapitoly byly využity tyto zdroje [2, 3, 6, 9, 10, 20, 23]

Tato kapitola se zabývá návrhem akumulační horkovodní tlakové nádrže. Pro dodržení potřebných hodnot teploty, tlaku a doby nabíjení je nutné zajistit správné dimenzování tlakové nádoby. Dimenzování probíhá na základě zadaných hodnot množství vody v akumulátoru (viz úvod) a dále pak výpočtů hmotnostních průtoků ve vodní nádrži (viz kapitola 4).

Obr. 7.1 Schéma horkovodního akumulátoru [vlastní zpracování]



Akumulátor bude konstruován z uhlíkové oceli P265GH jako stojatá tlaková nádoba o průměru 1 300 mm a bude uzavřen vysokotlakými dny. Dále bude opatřen potřebnými nátrubky pro přívod a odvod vody. Uvnitř bude vyložena speciální vestavbou, která zabrání mísení horké a studené vody při nabíjení a vybíjení. Pro kontrolu vestavby je plášť akumulátoru dělený a opatřený dělicí přírubou.

7.1 Výpočet hodnot stěn pláště

Tab. 7.1 Zadané hodnoty

Hlavní parametry	Hodnoty
Výpočtový přetlak [bar]	40
Výpočtová teplota [°C]	240
Vnější průměr trubky [mm]	1 300
Nominální tloušťka trubky [mm]	24
Minusová tolerance stanovené jmenovité tloušťky stěny [mm]	0,79
Korozní přírůstek [mm]	0,60
Součinitel svaru [-]	1

Tab. 7.2 Hlavní vlastnosti použitého materiálu

Hlavní parametry	Hodnoty
Materiál zásobníku	P265GH
Mez kluzu při 20° [MPa]	265
Mez kluzu při vypočtené teplotě [MPa]	181
Součinitel bezpečnosti k mezi kluzu pro: <ul style="list-style-type: none"> pracovní podmínky [-] tlakovou zkoušku [-] 	1,50 1,05
Mez pevnosti [MPa]	410
Součinitel bezpečnosti k mezi pevnosti [-]	2,40
Součinitel bezpečnosti k mezi pevnosti při tečení [-]	1,25

Dovolené namáhání skružence

(7.1)

$$f_s = \min \left\{ \frac{K_s}{s}; \frac{R_{ms}}{s_m} \right\}$$

$$f_s = \min \left\{ \frac{181}{1,5} = 120; \frac{410}{2,4} = 170,8 \right\}$$

$$f_s = 120 \text{ MPa}$$

Kde: f_s dovolené namáhání skružence,
 K_s mez skluzu při vypočtené teplotě,
 R_{ms} mez pevnosti,
 s součinitel bezpečnosti k mezi kluzu pro pracovní podmínky,
 sm součinitel bezpečnosti k mezi pevnosti.

Požadovaná tloušťka skružence

(7.2)

$$ect = \frac{do * pc}{(2 * f_s - pc) * v + 2 * pc}$$

$$ect = \frac{1\,300 * 4}{(2 * 120 - 4) * 1 + 2 * 4}$$

$$ect = 21,31\,mm$$

Kde: do vnější průměr skružence,
 ect požadovaná tloušťka skružence,
 f_s dovolené namáhání skružence,
 pc výpočtový přetlak,
 v součinitel svaru.

Výpočet požadované tloušťky skružence včetně přídaveků

(7.3)

$$ect' = ect + c_1 + c_2$$

$$ect' = 21,31 + 0,79 + 0,60$$

$$ect' = 22,7\,mm$$

$$22,7 < 24 \Rightarrow \text{Vyhovuje}$$

Kde: c_1 mínusová tolerance stanovené jmenovité tloušťky stěny,
 c_2 korozní přídavek skružence,

ect požadovaná tloušťka skružence,

ect' požadovaná tloušťka skružence včetně počítaných přídaveků.

Skutečná tloušťka skružence

(7.4)

$$ers = es - c_1 - c_2$$

$$ers = 24 - 0,79 - 0,60$$

$$ers = 22,61 \text{ mm}$$

Kde: c_1 mínusová tolerance stanovené jmenovité tloušťky stěny,

c_2 korozní přídavek skružence,

ers skutečná tloušťka skružence,

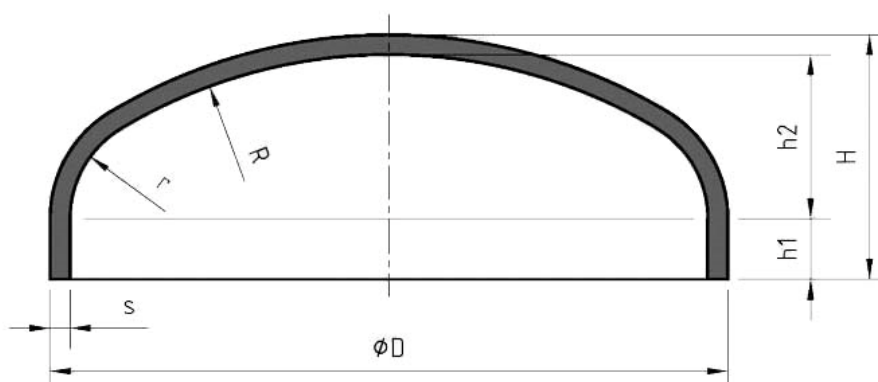
es nominální tloušťka skružence.

Pro výrobu volíme nejbližší vyšší možnou tloušťku běžně vyráběných plechů, tedy 24 mm.

7.2 Výběr velikosti dna

Výběr dna horkovodního akumulátoru byl vybrán podle normy DIN 28 013 93.

Obr. 7.2 Tvar dna dle normy DIN 28 013 93 [20]



Průměry dna se vyrábí od vnějšího průměru 42,4 mm až do průměru 4000 mm, přičemž tloušťka stěny může být v rozmezí 3 až 60 mm.

Výpočet poloměru výduti dna

(7.5)

$$R = 0,8 * D$$

$$R = 0,8 * 1\,300$$

$$R = 1\,040\text{ mm}$$

Kde: D..... vnější průměr dna,
R..... poloměr výduti dna.

Výpočet poloměru zaoblení vnějších hran dna

(7.6)

$$r = 0,154 * D$$

$$r = 0,154 * 1\,300$$

$$r = 200,2\text{ mm}$$

Kde: D..... vnější průměr dna,
r poloměr zaoblení vnějších hran dna.

Výpočet výšky přidavných okrajů

(7.7)

$$h_1 \geq 3 * s_d$$

$$h_1 \geq 3 * 30$$

$$h_1 \geq 90$$

Kde: h_1 výška přídavných okrajů,
 s_d tloušťka stěny dna.

Výpočet výšky zaoblení

(7.8)

$$h_2 = 0,255 * D - 0,635 * s_d$$

$$h_2 = 0,255 * 1\,300 - 0,635 * 30$$

$$h_2 = 312,45\,mm$$

Kde: D vnější průměr dna,
 h_2 výška zaoblení,
 s_d tloušťka stěny dna.

Výpočet objemu dna

(7.9)

$$V_d = 0,1298 * (D - 2 * s_d)^3$$

$$V_d = 0,1298 * (1,3 - 2 * 0,03)^3$$

$$V_d = 0,25\,m^3$$

Kde: D vnější průměr dna,
 s_d tloušťka stěny dna,
 V_d objem dna.

Výpočet váhy dna

(7.10)

$$m_d = D^2 * s_d * \rho * PŘ$$

$$m_d = 1,3^2 * 0,03 * 7\,850 * 1,5$$

$$m_d = 597\,kg$$

Kde: D..... vnější průměr dna,

m_d hmotnost dna,

PŘ..... přídavek pro vytvarování výduti,

s_d tloušťka dna,

ρ hustota oceli.

7.3 Výpočet hodnot sestavené akumulční nádrže

Výstupem této kapitoly budou hlavní parametry akumulční nádrže, které jsou potřebné pro určené celkové ceny akumulční nádrže.

Výpočet potřebného objemu akumulční nádrže

(7.11)

$$V_p = m_1 * V_m$$

$$V_p = 24\,983 * 0,00123$$

$$V_p = 30,73\,m^3$$

Kde: m_1 hmotnostní průtok na výstupu z horkovodního akumulátoru,

V_m měrný objem při teplotě 240 °C a tlaku 40 bar,

V_p potřebný objem akumulční nádrže.

Výpočet výšky nádrže pro získání potřebného objemu

Výška nádrže je počítána pomocí požadovaného objemu akumulární nádoby, od kterého je odečten objem spodního a vrchního dna. Tato hodnota je vložena do standartního výpočtu objemu válce, ze kterého je následně vyjádřena a počítána výška pláště. A k této výšce je ještě nutné připočítat výšku spodního a vrchního dna.

(7.12)

$$v_{an} = \frac{V_p - 2 * V_d}{\pi * \left(\frac{D}{2} - s_{pl}\right)^2} + 2 * (h_2 + s_d)$$
$$v_{an} = \frac{30,73 - 2 * 0,25}{3,14 * (0,65 - 0,024)^2} + 2 * (0,313 + 0,03)$$
$$v_{an} = 25,24 \text{ m}$$

Kde: D..... vnější průměr dna,
h₂ výška zaoblení,
s_d..... tloušťka dna,
s_{pl}..... tloušťka pláště,
v_{an} výška akumulární nádrže,
V_d objem dna,
V_p požadovaný objem akumulární nádrže.

Celková hmotnost akumulární nádrže

(7.12)

$$m_{an} = 2 * m_d + 2 * \pi * \frac{D}{2} * (v_{an} - 2 * (h_2 + s_d)) * s_{pl} * \rho$$
$$m_{an} = 2 * 597 + 2 * 3,14 * \frac{1,3}{2} * (25,24 - 2 * (0,313 + 0,03)) * 0,03 * 7\,850$$
$$m_{an} = 25\,473 \text{ kg}$$

Kde: D vnější průměr dna,
 h_2 výška zaoblení,
 m_{an} hmotnost akumulární nádrže,
 m_d hmotnost dna,
 s_d tloušťka stěny dna,
 s_{pl} tloušťka stěny pláště,
 v_{an} výška akumulární nádrže,
 ρ hustota oceli.

7.4 Určení ceny akumulátoru

Určení ceny bude provedeno dle odhadu ceny za kg oceli. Cena dna se pohybuje okolo 400 Kč/kg včetně celkového opracování oceli do podoby konečného výrobku, tj. dna. Cena pláště, tj. skružence je 90 Kč/kg včetně jeho celkového opracování. Nižší cena je dána znatelně jednodušším technologickým postupem.

Celková cena za obě dna

(7.13)

$$CC_d = 2 * m_d * KC_d$$

$$CC_d = 2 * 597 * 400$$

$$CC_d = 477\,600 \text{ Kč}$$

Kde: CC_d celková cena za obě dna,
 KC_d kilová cena dna,
 m_d hmotnost dna.

Celková cena pláště

(7.14)

$$CC_{pl} = (m_{an} - 2 * m_d) * KC_{pl}$$

$$CC_{pl} = (25\,473 - 2 * 597) * 90$$

$$CC_{pl} = 2\,185\,110 \text{ Kč}$$

Kde: CC_{pl} celková cena pláště,
 KC_{pl} kilová cena pláště,
 m_{an} hmotnost akumulární nádrže,
 m_d hmotnost dna.

Celková cena akumulární nádrže

(7.15)

$$CC_{an} = CC_d + CC_{pl}$$

$$CC_{pl} = 477\,600 + 2\,185\,110$$

$$CC_{pl} = 2\,662\,710 \text{ Kč}$$

Kde: CC_{an} celková cena akumulární nádrže
 CC_d celková cena za obě dna,
 CC_{pl} celková cena pláště.

7.5 Analýza vlivu ceny podle velikosti průměru

Avšak pro porovnání ceny a dalších klíčových parametrů bude tento průměr postupně měněn na 1 500 mm a 1 800 mm.

V tab. 7.3 a 7.4 jsou vypočítány hodnoty akumulátoru o průměrech 1 400 mm a 1 500 mm, přičemž celkový objem akumulátoru se nemění. Hodnoty jsou počítány na základě vzorců 7.1 – 7.15.

Tab. 7.3 Hodnoty akumulátoru průměru 1 400 mm

Parametry	Hodnoty
Vnější průměr dna [mm]	1 400
Poloměr výduti dna [mm]	1 120
Poloměr zaoblení vnějších hran dna [mm]	215,6
Tloušťka stěny dna [mm]	30
Zvolená tloušťka stěny pláště [mm]	25
Výška přídavných okrajů [mm]	90
Výška zaoblení [mm]	337,95
Objem dna [m ³]	0,31
Hrubá váha dna [kg]	692
Objem pláště [m ³]	30,11
Váha pláště [kg]	22 547
Výška akumulační nádrže [m]	21,77
Celková hmotnost akumulátoru [kg]	23 932
Cena akumulační nádrže [Kč]	2 583 137

Tab. 7.4 Hodnoty akumulátoru průměru 1 500 mm

Parametry	Hodnoty
Vnější průměr dna [mm]	1 500
Poloměr výduti dna [mm]	1 200
Poloměr zaoblení vnějších hran dna [mm]	231
Tloušťka stěny dna [mm]	30
Zvolená tloušťka stěny pláště [mm]	26

Výška přídavných okrajů [mm]	90
Výška zaoblení [mm]	363,45
Objem dna [m³]	0,39
Hrubá váha dna [kg]	795
Objem pláště [m³]	29,95
Váha pláště [kg]	21 060
Výška akumulární nádrže [m]	18,98
Celková hmotnost akumulátoru [kg]	22 650
Cena akumulární nádrže [Kč]	2 531 276

Výpočty cen akumulárních nádrží pro různé průměry dna ukázaly snižující se cenu v závislosti na zvyšujícím se průměru dna a zároveň snižující se výšce akumulární nádrže. Ačkoliv jsou pořizovací náklady na dna vyšší než pořizovací náklady na plášť v důsledku jednoduššího zpracování, v součtu celkových nákladů vychází nádrž s větším průměrem dna cenově lépe.

Při prvním zvětšení průměru dna o 100 mm na 1 400 mm se celkové náklady snížily přibližně o 80 000 Kč, avšak při druhém zvětšení průměru dna z 1 400 mm na 1 500 mm již nebylo snížení nákladů tak vysoké, jedná se o přibližně 50 000 Kč. Z tohoto vyplývá, že dno nelze v rámci úspory nákladů zvětšovat do nekonečna, nicméně lze zvolit optimální řešení jak z hlediska ceny, tak z hlediska rozměrů nádrže. Z tohoto důvodu se z výše uvedených možností jeví jakožto neoptimálnější varianta akumulární nádrž o průměru 1 500 mm a výšce necelých 19 m. Výkres navrženého horkovodního akumulátoru je součástí Přílohy č. 3.

8 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo přiblížit situaci akumulace elektrické energie ve světě s důrazem na akumulaci energie pomocí systému CAES, konkrétně EC CAES. Po analýze této technologie bylo přistoupeno k návrhu horkovodního akumulátoru. Tento návrh byl posuzován, jak z hlediska konstrukce, tak z hlediska pořizovací ceny, aby byla vybrána optimální varianta.

Druhá kapitola se zabývá počátky akumulace, jejím rozvojem a rozdělením jednotlivých typů akumulacích systémů včetně jejich principů akumulace. S rozvojem technologií a s tím spojenou větší spotřebou energie narůstá poptávka po akumulacích zdrojích. A vzhledem k ochraně životního prostředí roste poptávka i po ekologičtějších obnovitelných zdrojích pro výrobu elektrické energie. Jelikož se však jedná o nestabilní zdroje a nelze je ovládat, narůstá čím dál větší potřeba modernizace a rozvoje akumulacích zařízení, které by výkyvy v síti zachytily.

Další kapitola obsahuje popis tepelného schématu akumulace elektřiny v tlakovém vzduchu. Jsou zde rozebrány jednotlivé typy akumulacích zařízení se systémem CAES, včetně typu EC CAES, který je dále aplikován v praktické části práce. Je zde vysvětlen základní princip akumulacního systému horké tlakové vody do horkovodního zásobníku. Dále jsou zde vysvětleny možné pracovní režimy v systému EC CAES.

Čtvrtá a pátá kapitola se zabývá výpočty tepelné bilance systému horkovodního zásobníku v závislosti na změně hmotnostních průtoků v jednotlivých částech systému. Dále pak výpočty konečného elektrického výkonu na svorkách generátoru. Konečný výkon je jedním z parametrů, které mají vliv na rozhodnutí, zda bude konstrukce akumulacního zařízení realizována. Pro porovnání jednotlivých variant jsou vytvořeny analýzy hmotnostních průtoků a elektrického výkonu, jež jsou závislé na změně hodnot teplot a tlaků v horkovodním akumulátoru. Výpočty jsou prováděny na základě zjednodušených schémat. Ve výsledku má systém horkovodního akumulátoru mnoho pozitiv, např. dokáže vyrovnávat výkyvy v síti a především zvyšuje účinnost celého systému EC CAES.

U analýzy hmotnostních průtoků, lze vidět, že se nijak razantně nemění s výjimkou médií vycházejících z expandéru, jejichž výstupní poměry se naopak mění viditelně. Na

základě změny těchto hodnot se mění hmotnostní průtok na turbíně, který má vliv na výkon na svorkách generátoru. Z uvedených analýz lze vidět, že pokud se zvyšuje pouze teplota, výkon se zvyšuje o několik procent. Avšak pokud se zvýší tlak a teplota je udržována na mezi sytosti, tj. je také zvýšena oproti původní hodnotě, je zvýšení výkonu výraznější.

V šesté kapitole je nastíněno provozuschopné schéma zařízení, jež je rozděleno na 3 části. Ty mohou pracovat částečně samostatně, dohromady, nebo mohou případně spolupracovat 2 části, zatímco třetí stojí. Toto záleží na pracovním režimu systému, který je závislý na hodnotách sítě, tj. zda je potřeba energii akumulovat nebo naopak dodávat do elektrické sítě.

Poslední kapitola se věnuje návrhu horkovodního akumulátoru pro zjištění vhodné konstrukce a ceny výsledného zařízení. Hlavním parametrem, který je nutné dodržet, je požadovaný objem nádrže. Dalšími parametry, které je nutné brát v úvahu, jsou tloušťka pláště vypočtená pro zadanou teplotu a tlak a tloušťka dna, která je zvolena 30 mm.

U analýzy bylo zjištěno, že zvýšením průměru dna při nižší výšce je dosaženo nižší celkové ceny i přesto že kilová cena dna je vyšší než kilová cena pláště. Proto byla nakonec zvolena nádrž se dnem 1 500 mm a výškou necelých 19 m. Při dalším zvětšování průměru dna a zároveň snižování výšky nádrže by se dala očekávat její nižší celková cena, která by byla vhodnější i z hlediska lepší stability a konstrukce pro ustavení. Nicméně zvětšování průměru dna nelze aplikovat donekonečna, protože od určité hranice by se celková cena nesnižovala, ale zvyšovala kvůli vyšší kilové ceně dna.

Dle vypočtených hodnot lze říci, že se tento typ akumulace vyplatí i přes vysoké počáteční náklady. Protože energie uchována v nádrži v horké tlakové vodě při plném nabití systému je při průměrných spotřebitelských cenách elektrické energie přibližně v hodnotě 2 500 Kč. Při pravidelném používání tohoto akumulárního zařízení je doba návratnosti investice přibližně 2 roky.

9 Seznam použité literatury

- [1] ČEZ, Cesty k akumulaci elektrické energie, [online]. [05. 01. 2017]. Dostupný z WWW: <https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/06/cesty_1.html>
- [2] COMBIEEGYPT.COM, DIN 28 013, [online]. [27. 03. 2017]. Dostupný z WWW: <http://www.combiegypt.com/Content/Data/Products/Brochures/Standard_Heads%20Technical_Drawing_.pdf>
- [3] DIN 28 013. Gewölbte Böden Korbbogenform. Německo: Deutsches Institut für Normung e. V., 1993. 11 s.
- [4] ECO SHOP, Mechanické akumulátory energie, [online]. [13. 03. 2017]. Dostupný z WWW: <<http://www.ekodum.cz/podpzar/akumulat/mechakum.php>>
- [5] ELEKTRO ČASOPIS PRO ELEKTROTECHNIKU, Akumulace elektrické energie, [online]. [06. 03. 2017]. Dostupný z WWW: <<http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/akumulace-elektricke-energie-9696>>
- [6] IBLER, Zbyněk. *Technický průvodce energetika*. [1. díl]. Praha: BEN - technická literatura, 2002. ISBN 80-7300-026-1.
- [7] KADLEC, Zdeněk. *Termomechanika: návody do cvičení*. 2. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1736-1.
- [8] KONVIČKA Jaroslav, Ladislav VILIMEC a Miloš MAIER. *Zaměření vývoje koncepce technologie pro akumulaci elektřiny u decentrálních kogeneračních energetických zdrojů*. 2017.
- [9] KRATOCHVÍL, Tomáš. *Akumulace elektrické energie z obnovitelných zdrojů*. Brno, 2010. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav.
- [10] LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 3. dopl. vyd. Úvaly: Albra, 2006. ISBN 80-7361-033-7.
- [11] NAZELENO.CZ, Ukládání elektřiny z fotovoltaických a větrných elektráren, [online]. [13. 03. 2017]. Dostupný z WWW: <<http://www.nazeleno.cz/energie/energetika/ukladani-elekriny-z-fotovoltaickych-a-vetrnych-elekraren.aspx>>
- [12] NOVINKY.CZ, Přecherřavací elektrárna na Orlíku by využila přebytky slunečních elektráren, [online]. [13. 03. 2017]. Dostupný z WWW: <<https://www.novinky.cz/ekonomika/337572-precerpavaci-elekrarna-na-orliku-by-vyuzila-prebytky-slunecnich-elekraren.html>>

- [13] OENERGETICE.CZ, Největší baterie na světě, [online]. [25. 03. 2017]. Dostupný z WWW: < <http://oenergetice.cz/elektrina/akumulace-energie/nejvetsi-baterie-na-svete/>>
- [14] OENERGETICE.CZ, Palivové články – princip funkce a dělení, [online]. [11. 03. 2017]. Dostupný z WWW: < <http://oenergetice.cz/technologie/elektroenergetika/palivove-clanky-princip-funkce-a-deleni/>>
- [15] OENERGETICE.CZ, Průtoková baterie, [online]. [18. 01. 2017]. Dostupný z WWW: < <http://oenergetice.cz/technologie/elektroenergetika/prutokova-baterie/>>
- [16] OENERGETICE.CZ, Technologický plán akumulace energie (elektrické a tepelné), [online]. [16. 02. 2017]. Dostupný z WWW: < <http://oenergetice.cz/elektrina/akumulace-energie/technologicky-plan-v-oblasti-akumulace-energie/>>
- [17] OENERGETICE.CZ, Tesla začala v Gigafactory vyrábět nový „nejlepší a nejlevnější“ typ bateriových článků, [online]. [13. 03. 2017]. Dostupný z WWW: < <http://oenergetice.cz/elektrina/akumulace-energie/tesla-zacala-gigafactory-vyrabet-novy-nejlepsi-nejlevnejsi-typ-bateriovych-clanku/>>
- [18] RADIL, Lukáš. *Současné možnosti akumulace elektrické energie*. Brno, 2017. Přednáška. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky.
- [19] STORNETIC THE ENERGY STORAGE COMPANY, Energy storage from a purely dynamic source, [online]. [17. 03. 2017]. Dostupný z WWW: < <http://stornetic.com/>>
- [20] TECHNOKOV, Heads & Bottoms, [online]. [06. 03. 2017]. Dostupný z WWW: <<http://www.technokov.hu/index.php/en/bottoms>>
- [21] TZB INFO, Akumulace elektřiny, [online]. [01. 02. 2017]. Dostupný z WWW: < <http://oze.tzb-info.cz/7435-akumulace-elekriny>>
- [22] TZB INFO, Náklady na akumulaci elektřiny v sekundárních člancích, [online]. [01. 02. 2017]. Dostupný z WWW: < <http://oze.tzb-info.cz/10362-naklady-na-akumulaci-elekriny-v-sekundarnich-clancich>>
- [23] VILIMEC, Ladislav a Jiří JOSIEK. *Materiály a pevnostní dimenzování částí parních generátorů*. [Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita], 2011. ISBN 978-80-248-2512-0.
- [24] VILIMEC, Ladislav a Jaroslav KONVIČKA. *Akumulace elektřiny u decentralních energetických zdrojů*. 2017.

10 Seznam tabulek

Tab. 2.1 Srovnání hlavních výhod a nevýhod zmíněných způsobů akumulace energie	22
Tab. 4.1 Hodnoty entalpií	38
Tab. 4.2 Hodnota entalpie pro teplotu 245 °C	41
Tab. 4.3 Hodnoty hmotnostního průtoku dle tab. 4.2	41
Tab. 4.4 Hodnota entalpie pro teplotu 250 °C	41
Tab. 4.5 Hodnoty hmotnostního průtoku dle tab. 4.4	42
Tab. 4.6 Hodnoty entalpií pro tlak 40 baru při teplotě sytosti 250 °C.....	43
Tab. 4.7 Hodnoty hmotnostního průtoku dle tab. 4.6	43
Tab. 4.8 Hodnoty entalpií pro tlak 45 bar při teplotě sytosti 257,44 °C.....	43
Tab. 4.9 Hodnoty hmotnostního průtoku dle tab. 4.8	43
Tab. 4.10 Hodnoty entalpií pro tlak 50 bar při teplotě sytosti 263,94 °C.....	44
Tab. 4.11 Hodnoty hmotnostního průtoku dle tab. 4.10	44
Tab. 5. 1 Parametry na vstupu	47
Tab. 5. 2 Parametry na výstupu	48
Tab. 5.3 Hodnoty výkonu v závislosti na změně teplotě v horkovodním akumulátoru	50
Tab. 5.4 Hodnoty výkonu v závislosti na změně tlaku v horkovodním akumulátoru při úpravě teploty na mez sytosti.....	50
Tab. 7.1 Zadané hodnoty	58
Tab. 7.2 Hlavní vlastnosti použitého materiálu	58
Tab. 7.3 Hodnoty akumulátoru průměru 1 400 mm	67
Tab. 7.4 Hodnoty akumulátoru průměru 1 500 mm	67

11 Seznam obrázků

Obr. 2.1 Setrvačník	12
Obr. 2.2 Schéma vodní přečerpávací elektrárny	14
Obr. 2.3 Elektrárna se spalovací turbínou se systémem CAES	15
Obr. 2.4 Průtoková baterie	19
Obr. 2.5 Palivový článek.....	20
Obr. 3.1 Schéma akumulční elektrárny CAES	26
Obr. 3.2 Systém CAES	27
Obr. 3.3 Reálné zapojení elektrárny se spalovací turbínou a přídatným systémem CAES v Německém	28
Obr. 3.4 Schéma elektrárny se spalovací turbínou a systémem EC - CAES s vlastním akumulčním kompresorem.....	29
Obr. 3.5 Systém CAES s akumulací tepla kompresoru	32
Obr. 3.6 Schéma třístupňového akumulčního kompresoru	33
Obr. 4.1 Schéma systému pro akumulaci a následné využití horké vody	37
Obr. 4.2 Skutečné schéma systému s horkovodním akumulátorem	45
Obr. 5.1 Schéma turbíny a generátoru	47
Obr. 6.1 Změna výkonu v závislosti na teplotě v horkovodním akumulátoru.....	52
Obr. 6.2 Změna výkonu v závislosti na teplotě v horkovodním akumulátoru.....	55
Obr. 7.1 Schéma horkovodního akumulátoru	57
Obr. 7.2 Tvar dna dle normy DIN 28 013 93	60

12 Seznam grafů

Graf 2.1 Srovnání akumulčních prostředků v závislosti na hustotě energie	23
Graf 2.2 Srovnání akumulčních prostředků v závislosti na nákladech	23
Graf 2.3 Srovnání akumulčních prostředků v závislosti na účinnosti a životnosti	24
Graf 4.1 Změna hmotnostního průtoku v závislosti na teplotě v horkovodním akumulátoru	42
Graf 4.2 Změna hmotnostního průtoku v závislosti na tlaku v horkovodním akumulátoru při úpravě teploty na mez sytosti	44

13 Přílohy

Příloha č. 1: Skutečné schéma systému s horkovodním akumulátorem

Příloha č. 2: Změna výkonu v závislosti na teplotě v horkovodním akumulátoru

Příloha č. 3: Výkres horkovodního akumulátoru